

Projecte de Fi de Carrera

Enginyeria de Materials

Obtenció, caracterització i selecció de nous aliatges base coure per al sector ferroviari

Autor: Joaquim Molera Traveria

Director: Mònica Martínez López

Convocatòria: Setembre 2015



**Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona**



RESUM

En el present projecte, neix a petició de l'empresa La Farga Lacambra, la qual realitza el requeriment per a la busca d'un nou aliatge base coure per a aplicacions ferroviàries, el qual pugui ser processat en les instal·lacions de l'empresa.

Fins al moment l'aliatge majoritàriament utilitzat en aplicacions ferroviàries, es el CuMg0.2% – CuMg0.5%, els quals no poden ser fabricats en les instal·lacions de l'empresa. Degut a aquest motiu l'empresa decideix arrancar un projecte per a la busca d'un nou aliatge base coure apte per a les aplicacions ferroviàries.

Durant el transcurs del projecte, es realitza primer de tot una selecció dels possibles elements d'aliatge. Aquesta selecció es realitza en funció de diferents paràmetres com són: cost, perillositat,....

Un cop feta la selecció, es procedeix a fer les diferents proves dels aliatges. La selecció dels aliatges es realitzen en funció també de paràmetres subministrats per l'empresa La Farga Lacambra.

Un cop realitzats els aliatges, aquests es caracteritzen en funció de les propietats, les quals són prioritàries per a la selecció d'un aliatge per a ser utilitzat en el sector ferroviari.

Per acabar, i en funció dels resultats obtinguts, es realitza una estudi de viabilitat econòmica dels diferents aliatges que han presentat millors propietats. Aquest estudi es realitza per a determinar si aquest aliatge podria ser viable econòmicament.

Index

0.	Index.....	4
1.	Objectiu	7
2.	Abast	8
3.	Justificació	9
4.	Especificacions bàsiques.....	10
5.	Conceptes previs	12
5.1	Historia del coure	12
5.2	Principals propietats del coure.	13
5.3	Definició i tipus de coure	14
5.4	Processos d'afinat del coure	15
5.4.1	Procés d'afinat electrolític	15
5.4.2	Proces d'afinat pirometal·lúrgic	16
5.4.3	Comparativa del procés de afinat electrolític front al proces d'afinat pirometal·lúrgic.....	16
5.5	Tipus de colades de coure	18
5.5.1	Colada contínua tradicional.....	19
5.5.2	Colada continua tipus Up-Cast.....	21
5.6	Productes obtinguts a partir d'alambrons	21
Els alambrons són el primer estadi en el procés de manufacturació del coure ja que a partir d'ells s'obtenen la majoria de productes acabats i comercials.....		21
5.6.1	Trefilats	22
5.6.2	Obtenció del fil de contacte renurat (FDCR)	23
5.7	Parts constitutives de la catenària.....	24
5.7.1	Pal sustentador	25
5.7.2	Fil sustentador	25
5.7.3	Pèndola.....	25
5.7.4	Fil de contacte ranurat (FDCR)	25
5.8	Característiques en servei de la catenària.....	26
5.8.1	Fil sustentador.....	27
5.8.2	Pèndoles	27
5.8.3	Fil de contacte ranurat (FDCR).....	27
6.	Estat de l'art.....	33
6.1	Coure (CuETP)	33

6.2	Coure plata (CuAg0.1)	33
6.3	Coure estany (CuSn0,2).....	33
6.4	Coure magnesi (CuMg0.5)	34
7.	Metodologia experimental.....	36
7.1	Selecció de materials aleants.....	36
7.1.1	Criteris per a la selecció de materials.....	36
7.1.2	Comentaris als resultats mostrats en la taula periòdica.....	38
7.1.3	Límits de concentració aplicables.....	39
7.2	Obtenció dels aliatges	40
7.2.1	Forn d'inducció.....	40
7.2.2	Condicions experimentals	42
7.2.3	Descripció del procés de colada.....	42
7.3	Determinació de les propietats	43
7.3.1	Determinació de la composició química.....	43
7.3.2	Determinació de la conductivitat elèctrica	45
7.3.3	Determinació de la temperatura de recuit.....	45
8.	Resultats obtinguts.	49
8.1	Calibració tècnica dels resultats obtinguts.....	50
8.2	Detall dels experiments realitzats.....	53
8.2.1	Detall dels resultats de la mostra numero 1	53
8.2.2	Detall dels resultats de la mostra numero 2.....	54
8.2.3	Detall dels resultats de la mostra numero 5.....	55
8.2.4	Detall dels resultats de la mostra numero 16.....	56
8.2.5	Detall dels resultats de la mostra numero 20.....	57
8.2.6	Detall dels resultats de la mostra numero 27.....	58
8.2.7	Detall dels resultats de la mostra numero 29.....	59
8.2.8	Detall dels resultats de la mostra numero 30.....	60
8.2.9	Detall dels resultats de la mostra numero 38.....	61
9.	Discussió de resultats.....	62
9.1	Correcció de l'error de mesura	62
9.2	Calibració econòmica dels aliatges obtinguts	64
10.	Impacte mediambiental	68
11.	Viabilitat Econòmica.....	69
11.1	Estimació del preu del coure.....	71
11.2	Previsió de ventes.....	73

11.3	Costos de producció.....	74
11.4	Ingressos	75
11.5	Marcadors Econòmics.....	75
12.	Pressupost econòmic del projecte.....	80
12.1	Cost d'adquisició del Coure.....	80
12.2	Elements dopants	80
12.3	Mecanitzat de mostres	82
12.4	Bombona de Nitrogen	82
12.5	Preparació de mostres	82
12.5.1	Costos de fusió de mostres.....	82
12.5.2	Costos del fresat de mostres.....	83
12.5.3	Cost dels anàlisis de conductivitat	83
12.5.4	Cost dels anàlisis químics.	83
12.5.5	Cost dels assajos per a la determinació de la temperatura de recuit. 83	
12.5.6	Costos d'enginyeria.....	84
12.5.7	Altres costos del projecte.	84
12.6	Resum del pressupost.....	85
13.	Planificació del projecte.....	86
14.	Bibliografia	89
14.1	Recerca bibliogràfica convencional	89
14.2	Recerca bibliogràfica per internet.....	90
ANEX I	91

1. Objectiu

L'objectiu del projecte, és determinar l'efecte que tenen sobre les propietats mecàniques i elèctriques del coure una sèrie d'elements químics aleants.

L'objectiu final de l'estudi, és desenvolupar una nova aleació base coure, la qual pugui ser processada a les instal·lacions de l'empresa La Farga Lacambra i que millorin en propietats els aliatges existents en el mercat ferroviari en l'actualitat. Aquest mercat, demana bàsicament 3 propietats:

- Conductivitat elèctrica
- Propietats mecàniques
- Temperatura de recuit

Es determinarà l'efecte de diferents elements d'aliatge, ja sigui individualment o combinats entre si, sobre les propietats del coure.

2. Abast

El projecte es desenvoluparà en les següents etapes:

- Estudi bibliogràfic sobre diferents aliatges de Cu ja existents.
Selecció dels possibles elements d'aliatge. Els criteris de selecció vindran determinats per les condicions d'obtenció i processat dels aliatges per part de l'empresa sol·licitant.
- Selecció de materials.
A partir de les dades obtingudes en la recerca bibliogràfica es realitzarà la selecció dels aliatges més susceptibles d'oferir un resultat exitós. En total es seleccionaran 5 possibles elements d'aliatge.
- Disseny i obtenció dels aliatges.
Els elements seleccionats s'alearan amb el coure per si sols i a diferents concentracions, així com també es realitzaran proves per determinar l'efecte que tenen sobre les propietats del coure diferents elements aleants simultàniament. El criteri principal a l'hora de determinar les diferents concentracions d'elements aleants en el coure, serà la possibilitat de processat a les instal·lacions de la empresa sol·licitant.
- Estudi experimental. La fase experimental del projecte es desenvoluparà entorn als següents punts:
 - Obtenció de diferents aliatges amb diferents concentracions d'un mateix element, i alhora combinant elements entre sí.
 - Determinació de la conductivitat elèctrica i temperatura de recuit sobre cada aliatge obtingut.

3. Justificació

L'empresa sol·licitant està interessada en desenvolupar nous aliatges base coure, aptes per ser utilitzats dins el mercat ferroviari. Actualment, es fa servir Cu sense alear (CuETP), o CuAg0,1% per a línies ferroviàries de baixa velocitat. Per a les línies d'alta velocitat, s'utilitzen aliatges base coure, amb una elevada temperatura de recuit (superior als 360°C), com són aliatges de coure amb magnesi (CuMg0.2% / CuMg0.5%) o estany (CuSn0.2%). Aquests aliatges s'han de processar en absència d'oxigen, fet pel qual no es poden fabricar en les instal·lacions de l'empresa sol·licitant.

Degut a que aquests aliatges no poden ser processats dins les instal·lacions de l'empresa sol·licitant, es decideix obrir una nova via d'investigació per a desenvolupar nous aliatges aptes per ser processades dins les instal·lacions de l'empresa sol·licitant

El mercat potencial a nivell europeu per al coure destinat a línies ferroviàries es de centenars de milions d'euros, oferint un marge comercial net superior a la resta de productes de l'empresa La Farga Lacambra.

4. Especificacions bàsiques.

El producte final ha de complir amb les següents especificacions tècniques.

- Una conductivitat elèctrica superior a 85% IACS.
- Una temperatura de recuit superior a 673 K.
- Una resistència a la tracció superior a 500 MPa un cop deformat en fred un 70% en secció.

A nivell de procés, aquest haurà de ser factible en les actuals instal·lacions de la empresa sol·licitant, en conseqüència haurà de complir els següents requisits.

- Obtenció de l'aliatge mitjançant un procés pirometal·lúrgic en presència d'oxigen.
- Que aquest aliatge pugui ser processat en la colada contínua de coure

A nivell comercial el producte haurà d'oferir un marge suficient com per ésser econòmicament rentable i al mateix temps ser competitiu en preu respecte als altres aliatges existents actualment en el mercat. Per tant s'haurà de:

- Minimitzar els costos de producció de tal manera que sigui factible una comercialització amb preu 15% superior al del coure en brut en els mercats financers.

En el gràfic adjunt, es mostren les propietats dels aliatges existents actualment en el mercat destinats a l'electrificació de línies ferroviàries.

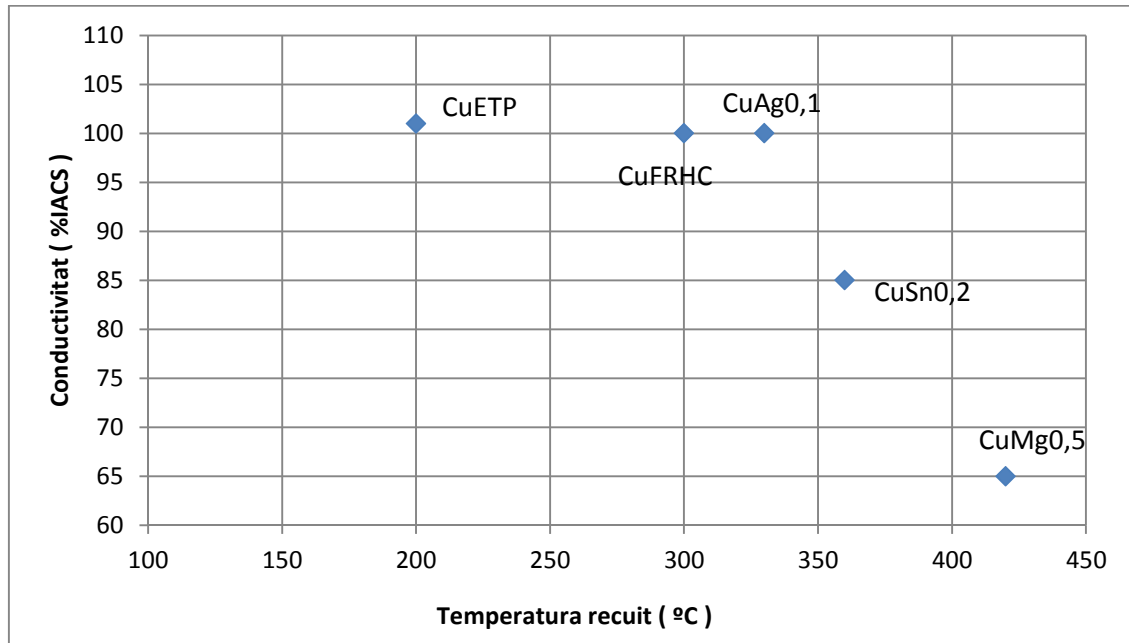


Figura 4.1: Gràfic comparatiu de propietats de diferents aliatges existents al mercat ferroviari

De cara a obtenir una major versatilitat a nivell comercial, es considera insuficient obtenir un sol aliatge amb propietats mecàniques i cost adequats, per aquesta raó es pretén obtenir un ventall de productes que aportin major solidesa a la proposta comercial de la empresa. Per tant es pretén:

- Obtenir al menys dos aliatges que compleixin amb les característiques tècniques i econòmiques exigides.

5. Conceptes previs

De cara a situar en el context adequat el treball realitzat en aquest projecte així com la situació de la empresa sol·licitant es procedirà a exposar els punts següents.

5.1 Historia del coure

La utilització del coure es remunta a uns 10.000 anys, quan els humans el començaren a utilitzar per a la fabricació d'eines. El fet de que el coure fos dúctil i amb una resistència desconeguda fins aleshores, va facilitar l'explotació del seu ús. Fins al moment, l'objecte de coure més antic trobat fins al moment, és una arracada, que la seva fabricació es data l'any 8700 A.C.

La mineria del coure es va desenvolupar en civilitzacions com són l'egípcia i la sumèria. Posteriorment es va desenvolupar per tot el món. A més el seu posterior aliatge amb l'estany per formar el bronze, va suposar un gran pas endavant per al desenvolupament de les civilitzacions.

Tot i aquests fets, el nom del coure és degut als jaciments de coure situats a Xipre, ja que la paraula del llatí per descriure el coure, és "cuprum" el qual prové de *Cyprium*, nom amb el qual coneixien Xipre els romans.

Durant el segle XIX, hi va haver una gran demanda de coure degut a la revolució industrial, ja que va ser llavors quan es va aprofitar la principal propietat del coure, la seva elevada conductivitat elèctrica.

A principis del segle XX, hi havia una demanda mundial de coure que vorejava les 500.000 Tn, amb els principals jaciments de coure ja explotats, els quals estaven situats majoritàriament a Xile.

Actualment, encara hi ha jaciments de coure importants a Canadà, USA i Brasil, tot i que els principals jaciments de coure es troben a Xile (35,5 % de la producció mundial) i és aquest país que es calcula que conté entre el 40 i el 50% de les reserves mundials de coure. Els principals jaciments de Chile són: Chuquibambilla, El Teniente, El Salvador, Escondida i Collahuasi.

El principal mercat del coure (en forma de mineral) de Xile és Asia amb un 47%, seguit d'Europa amb un 35%, Amèrica del Nord amb un 11% i Amèrica del Sud amb un 7%

Tot i que el contingut de coure en l'escorça terrestre es calcula que és del 0,01%, els seus jaciments tenen una riquesa del 5%. Actualment però, degut a l'augment de preu que pateix aquest metall, l'explotació de jaciments amb un 2-3% de coure ja són rentables, ja que el cost per tona de coure, va passar a ser de 2400 \$ al desembre del 2004, a 9500 \$ al desembre del 2010.

Els principals minerals de coure són els sulfurs, els quals contenen ferro i en menor quantitat, arsènic, bismut, plom, antimoni, or, plata i níquel.

Degut a que durant les últimes dècades han augmentat les desfetes de coure (cables, tubs, ...), s'han desenvolupat noves tecnologies de processat que en permeten el seu reciclatge.

5.2 Principals propietats del coure.

El coure és un metall de transició classificat en el grup IB de la taula periòdica. A continuació es detallen les seves característiques principals:

Propietat	Unitat	Valor
Nº atòmic	-	29
Pes molecular	uma	63,53
Conductivitat elèctrica	%IACS	101,8
Conductivitat tèrmica	W /(m *K) ⁴	400
Densitat	g/cc	8,89
Temperatura de fusió	°C	1083
Temperatura de recuit	°C	180
Duresa	escala mhos	3
Resistència tracció (recuit)	MPa	220
Límit elàstic (recuit)	MPa	60
Estructura cristal·lina	-	FCC
Potencial reducció estàndar: $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Cu}$ $\text{Cu}^+ + 1\text{e}^- \longrightarrow \text{Cu}$	V	+0.34 +0.52

Taula 5.0: Principals propietats del coure.

Degut al seu potencial de reducció estàndard el coure té una elevada resistència a la corrosió

De totes les seves propietats, la que justifica el seu elevat ús, és la seva excel·lent conductivitat elèctrica. L'únic metall que supera el coure en quant a conductivitat elèctrica, és la plata amb 108% IACS de conductivitat. Tant és així, que tot i que les unitats de conductivitat elèctrica en el sistema internacional siguin els Siemens per metre, la unitat que més s'utilitza són els %IACS (International American Copper Standard) sistema el qual té com a referència el coure quant l'any 1913 li varen assignar 100 %IACS. Actualment els sistemes d'afinatge i producció del coure ETP han millorat, permetent assolir els 101.8 %IACS.

5.3 Definició i tipus de coure

La versatilitat del coure a l'hora d'aliar-lo amb altres metalls, així com les variacions en les seves propietats en funció de tractaments concrets, fan que el nombre de varietats de coure en el mercat sigui força elevat. A continuació es passen a detallar els tipus i formats de coure més habituals en la actualitat.

- ✓ **Coure:** S'anomena així a l'element químic i als seus productes metal·lúrgics en els que només hi poden haver altres elements en forma d'impuresa.
- ✓ **Coure “Blister” o coure negre:** És el coure obtingut a partir dels minerals de coure mitjançant un procés de fusió i posterior tractament en un convertidor. Té una puresa del 99,5%
- ✓ **Coure de cementació:** És l'obtingut per via humida, a través de dissolucions de sals de coure.
- ✓ **Coure d'afinat tèrmic i elevada conductivitat (Cu-FRHC):** (Fire Refined High Conductivity). És el que s'obté a través d'afinatge pirometal·lúrgic de ferralla de coure. Conté una puresa de 99,90 % de coure i una conductivitat elèctrica mínima de 100 %IACS en estat recuit.
- ✓ **Coure electrolític (Cu-ETP):** (Electrolitic Tough Pitch) És el que s'obté a través d'electròlisi. Té un contingut mínim de coure de 99,99% i una conductivitat mínima de 101 %IACS en estat recuit.
- ✓ **Coure OFHC (Oxygen Free High Conductivity):** És el coure més pur (99.999% Cu) i el més conductor (102%IACS). Presenta una elevada maquinabilitat. S'obté a partir de fusió i colada de CuETP en atmosfera reductora.

5.4 Processos d'afinat del coure

Una de les especificacions bàsiques d'aquest projecte és l'adaptabilitat de l'aliatge seleccionat a ésser obtingut mitjançant l'actual procés d'afinatge pirometal·lúrgic del coure que utilitza l'empresa sol·licitant. Actualment existeixen 2 tipus d'afinatge del coure, l'afinatge l'electrolític i el pirometal·lúrgic. A continuació es detallen els 2 sistemes:

5.4.1 Procés d'afinat electrolític

El coure en estat natural, es troba en forma de sulfurs i òxids. Per a tal d'obtenir el coure metàl·lic, s'han de portar a terme un seguit d'etapes:

1. **Trituració.** En aquesta etapa el mineral es tritura fins a diàmetres inferiors als 2 cm.
2. **Molturació.** En aquesta etapa es redueix la mida de la partícula fins als 0,18 mm.
3. **Flotació.** Es forma una polpa amb aigua i reactius, per obtenir el concentrat de coure, amb un 25 % en coure contingut, a través de flotació.

A partir d'aquest punt hi ha 2 vies industrials per a l'obtenció del producte final:

- A) Fusió i afinatge electrolític
- B) Lixiviació i afinatge electrolític.

A) Fusió i afinat electrolític. En aquest camí en la primera etapa de fusió del concentrat, s'obté un producte intermedi conegut com a mata de coure, amb un contingut en coure entre el 40 i el 60 % aproximadament. Seguidament en un forn, s'oxida la mata de coure, eliminant així el ferro i el sofre en forma d'òxids, obtenint el coure blíster. Aquest coure blíster es cola en forma de planxes de 1m x 1m les quals seran els ànodes en el procés d'afinatge electrolític. Aquest procés d'electròlisis, es porta a terme en una solució d'àcid sulfúric. En cada cel·la electrolítica, s'intercalen els ànodes amb planxes de les mateixes dimensions però d'acer inoxidable, les quals actuen com a càtodes. El coure d'alta puresa (>99,90%) es diposita en el càtode, mentre que les impureses queden en la dissolució d'àcid sulfúric i els metalls nobles, formen l'anomenat fang electrolític. Els càtodes de coure comercials tenen un pes de 50 kg cadascun, i es necessiten 7 dies per obtenir cada càtode.

B) Lixiviació i obtenció electrolítica. La lixiviació és un procés hidrometal·lúrgic que permet l'obtenció de coure a partir de concentrats de coure. Aquest procés es basa en apilar el mineral de coure triturat i aplicar sobre aquest una solució aquosa que conté una bactèria (*Bacillus thiooxidans*), aquesta bactèria transforma el sulfur de coure (que no és soluble en aigua) en sulfat de coure (soluble en aigua). Per tant, al recollir les aigües, s'obté una dissolució de coure d'alta puresa. Aquesta dissolució s'addiciona directament sobre el bany electrolític per a l'obtenció dels càtodes de coure, amb una puresa >99,99% de coure, mitjançant la reducció del Cu^{2+} a Cu^0 .

5.4.2 Procés d'afinat pirometal·lúrgic

Aquest sistema es basa en fondre la ferralla de coure i un seguit d'etapes amb una sèrie d'escorificants, que permeten l'eliminació selectiva de les impureses que es troben dins el coure en estat líquid fins obtenir la composició desitjada. Com a matèria primera s'utilitza ferralla i desfets de coure. El procés d'afinat pirometal·lúrgic del coure està patentat per l'empresa La Farga Lacambra (U.S. patent N° **6797082**). Aquest procés permet obtenir un coure amb una puresa del 99.95%

El coure obtingut a través del sistema pirometal·lúrgic, és el coure FRHC, amb un contingut màxim de 1000ppm d'impureses.

5.4.3 Comparativa del procés de afinat electrolític front al procés d'afinat pirometal·lúrgic

Un cop exposats els dos sistemes, resulten evidents les importants diferències tant a nivell de procés, de temps i d'impacte ecològic que presenten les dues alternatives descrites.

Per exposar de forma més clara els avantatges i desavantatges de cada procés, a continuació es mostra una taula on es comparen les principals etapes dels dos sistemes d'obtenció de CuETP i CuFRHC:

	<i>Afinat Electrolític</i>	<i>Afinat Pirometal·lúrgic</i>
<i>Matèria primera</i>	Mineral	Ferralla de coure
<i>Operacions Involucrades</i>	Molturació	-
	Fusió	Fusió
	Afinat	Afinat
	Producció de Ànodes	-
	Electròlisis	-
	Obtenció de Càtodes	-
	Fusió	-
	Colada	Colada
<i>Temps de residència</i>	Manufacturat	Manufacturat
	15 dies	24 hores

Taula 5.1: Comparativa dels 2 processos d'afinat del coure.

Com es pot observar a la taula anterior, el procés d'afinatge pirometal·lúrgic, presenta grans avantatges sobre el procés electrolític.

Les principals avantatges són:

- Disminució del consum energètic per tona produïda ja que el nombre d'operacions és menor i no hi ha electròlisis. Evitant així l'emissió de gasos d'efecte hivernacle a l'atmosfera.
- Disminució del cost de producció, ja que les etapes de producció són menors alhora que el temps de residència del material és molt menor i aquest fet es converteix en menors costos financers deguts a la immobilització de material. Aquest fet ha estat el que ha contribuït de forma significativa a l'ús de la tecnologia d'afinatge pirometal·lúrgic des de l'inici de la crisi financera de l'any

2007. Moltes de les empreses que utilitzaven el procés d'afinat electrolític no han pogut suportar l'encariment del finançament, agreujat per la forta pujada del preu del coure.

Aproximadament es calcula que el consum per a la producció d'una tona de CuFRHC es 10 cops inferior a la del CuETP.

	Afinatge Electrolític	Afinatge Pirometalúrgic
Consum d'aigua (m^3/Tm alambró)	46	1
Consum elèctric (kWh/Tm alambró)	4000	1600
Emisio de SO_2 (kg/Tm alambró)	75	0,1
Alliberació de metalls en mars i rius (g/Tm alambró)	30	0,0003
Producció de residu sec(kg residu/kg alambró)	3	0,001

Taula 5.3: Factors energètics afinat electrolític i pirometal·lúrgic del coure.

A la taula anterior es pot veure que existeix una gran reducció en quan a consum tant d'aigua, com d'energia elèctrica, així com també una gran reducció en emissions SO_2 i de producció de residus.

5.5 Tipus de colades de coure

El principal semielaborat de coure, a partir del qual s'obtenen la resta de manufacturats, és l'alambró de coure, el qual pot tenir un diàmetre entre 8 i 20mm. L'alambró s'obté per colada contínua. Actualment hi ha 2 sistemes de colades contínues de coure per a la producció d'alambró:

- Tradicional, tipus Properzzi (SouthWire o Hazzelet)
- Tipus Up-Cast

5.5.1 Colada contínua tradicional

Un cop es té el coure líquid (també anomenat: caldo) amb la composició química desitjada, es fa passar el coure líquid a través d'un orifici, el qual condueix el líquid fins a un motlle continu de coure format per una roda i una cinta d'acer inoxidable. La roda en forma de u i la cinta s'uneixen en el moment en el que el coure líquid entra dins el motlle.

Un sistema d'aspersors d'aigua refrigera tant la cinta com la roda, solidificant el líquid i obtenint així el primer semielaborat de coure, anomenat “palanquilla”.

A continuació es mostra el semielaborat obtingut de la solidificació, anomenat “palanquilla”:



Figura 5.2: Imatge de la “palanquilla”

Per obtenir l'alambró, la “palanquilla” entra en un laminador, format per un sistema de 3 cèrcols, que va laminant la “palanquilla” fins a obtenir l'alambró. Aquest es fa passar per una unitat de refredament amb aigua i una segona unitat de decapat amb alcohol isopropílic, finalment un sistema d'enrotllat, forma l'anomenat “ jumbo “ que són bobines d'alambró de 5 Tn.



Figura 5.2: Imatge d'un jumbo d'alambró de 8mm ø

Variant els passos de laminació, es poden obtenir alambrons de diferents diàmetres, 12, 17, 20, 23 i 25mm de diàmetre.

La producció d'una colada contínua tipus tradicional, varia entre 15 tn/hora a La Farga Lacambra (CuFRHC) o 25 tn/hora a La Farga Rod (CuETP). Tot i això, hi ha colades que arriben a les 50 tn/hora.

Als anys noranta, l'ús d'aquesta tecnologia, va suposar una autèntica revolució al sector degut a que anteriorment, la excessiva quantitat de impureses incloses dins el coure obtingut a partir de ferralla (Fe, Ag, Sn, Pb...) feia impossible aquest tipus de processat.

A continuació es mostra un esquema d'una colada contínua Properzzi:

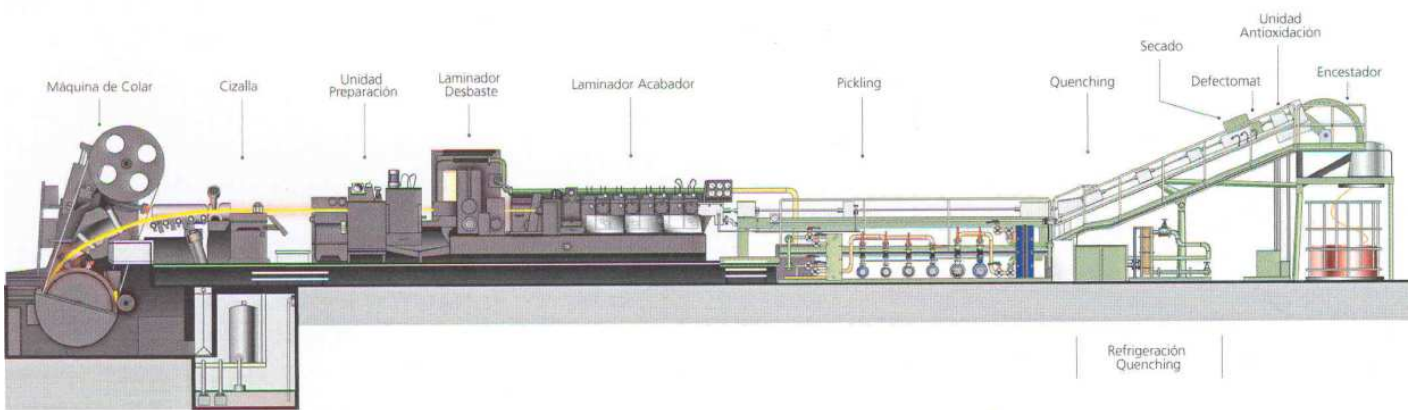


Figura 5.3: Esquema de colada contínua de LFL

5.5.2 Colada continua tipus Up-Cast

La colada tipus Up-Cast, consisteix en submergir un motlle refrigerat de grafit (anomenat filera) amb les dimensions del producte a obtenir, dins un bany de coure líquid per la part superior. A'iniciar la colada, es pren un alambró de sacrifici el qual es submergeix dins el líquid per un extrem i es col·loca enmig d'uns corròns de tracció per l'altre extrem. A mesura que els corròns de tracció van estirant l'alambró amunt, el líquid va solidificant dins la filera creant així un alambró continu de coure.

A continuació es mostra un esquema d'una colada tipus Up-Cast:

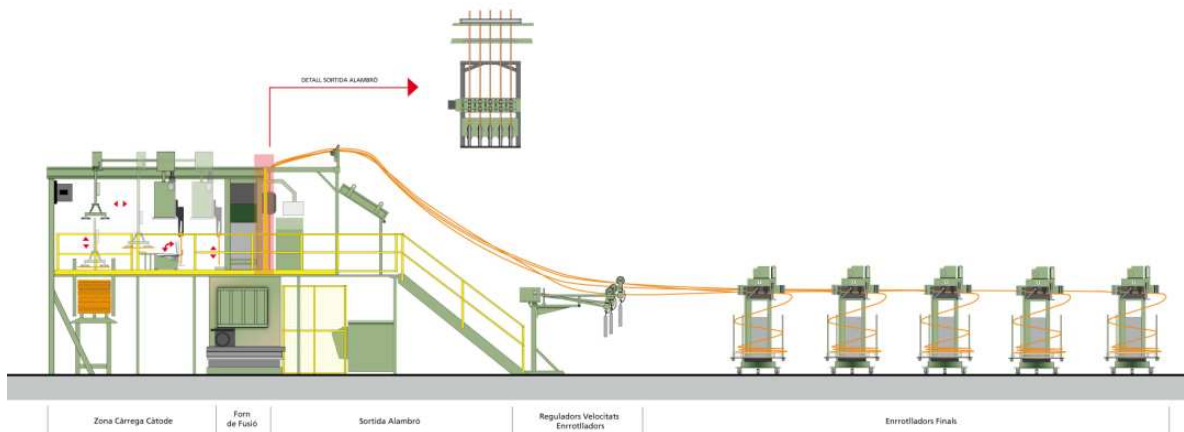


Figura 5.4: Esquema d'una colada tipus Up-Cast

Tot i que aquest sistema permet arribar a colar fins a 20 alambrons simultàniament, la velocitat de treball pot ser de 100 kg×alambró/hora. Per tant aquest sistema té una productivitat molt menor respecte a les colades contínues tradicionals.

L'avantatge d'aquest sistema, és que permet aïllar el coure líquid de l'atmosfera, ja que es cobreix la superfície del Cu amb grafit el qual actua com a reductor i protector de l'oxidació del coure, permetent així la producció de gran varietat d'aliatges (CuMg, CuSn, ...) i la producció de CuOF (oxigen-free).

5.6 Productes obtinguts a partir d'alambrons

Els alambrons són el primer estadi en el procés de manufacturació del coure ja que a partir d'ells s'obtenen la majoria de productes acabats i comercials.

5.6.1 Trefilats

L'obtenció de fils de coure de diàmetres inferiors a 8mmØ, es fa industrialment a través d'un trefilat de l'alambró de 8mm de diàmetre. L'alambró es fa passar a través d'un seguit de fileres les quals en redueixen la secció. Aquest procés es duu a terme en fred, per tant el material, un cop trefilat s'endureix per deformació. Si es requereix material en estat recuit (per obtenir una millor conductivitat elèctrica, ...) el fil es fa passar per un forn de recuit en continu. Aquest forn el que fa, es aplicar un voltatge a mesura que el fil va passant entre els 2 contactes elèctrics. Per efecte Joule, el fil s'escalfa i recou. El voltatge aplicat dependrà de la velocitat del procés, així com del diàmetre del fil a recoure.

A les instal·lacions de La Farga Lacambra, l'alambró de 8mm de diàmetre es trefila fins a obtenir un fil de 2mm de diàmetre en estat dur. Seguidament el fil s'introdueix en trefiladores que permeten treballar amb conjunts de fils (4, 6, 8, 12, 16 i 32 fils alhora). En aquest cas el diàmetre final pot arribar a ser de fins a 0,20mm. És al final de tot el procés quan es recou el fil en cas que sigui necessari. A la imatge 5.5 es pot veure una imatge d'un unitat de trefilat i recuit.

La manipulació de les diferents variables d'aquest procés, com són diàmetre, nº fils, estat material (recuit o dur), genera productes amb característiques diferents que permeten oferir un ventall important de productes al mercat sense un sobrecost significatiu.

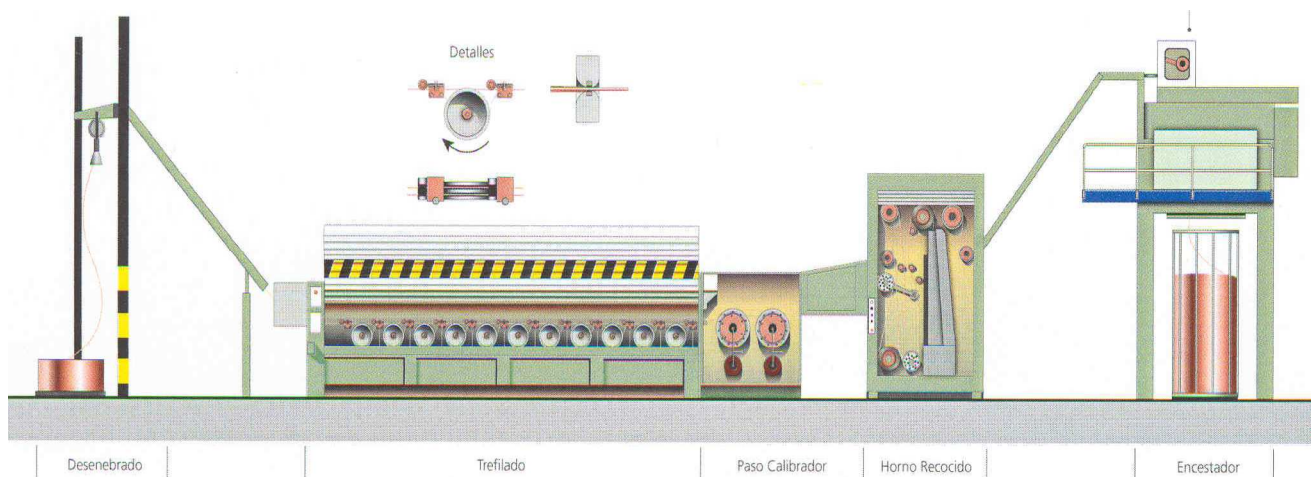


Figura 5.5: Unitat de trefilat i recuit

Un cop obtinguts els fils, aquests alhora es poden agrupar formant cordes de coure per obtenir els conductor elèctrics.

5.6.2 Obtenció del fil de contacte renurat (FDCR)

El fil de contacte ranurat (FDCR) s'obté a partir d'alambrons amb diàmetres majors a 20mm, segons sigui el producte final (secció, aliatge, ...)

El FRCR, es fabrica també a través d'un procés de trefilat de l'alambró, tot i que les fileres de trefilat per a aquest procés són diferents, ja que la secció del FDCR no és circular sinó que conté les dues regates per a la subjecció del FDCR i deixar així lliure la zona inferior, la qual és la zona que entra en contacte amb el pantògraf del comboi. Per tant, les fileres han de ser el negatiu de la secció desitjada (figura 5.6). Aquesta secció final, es va preformant en els successius passos de trefilat. (figura 5.7)



Figura 5.6: Fil de contacte de CuAg0,1

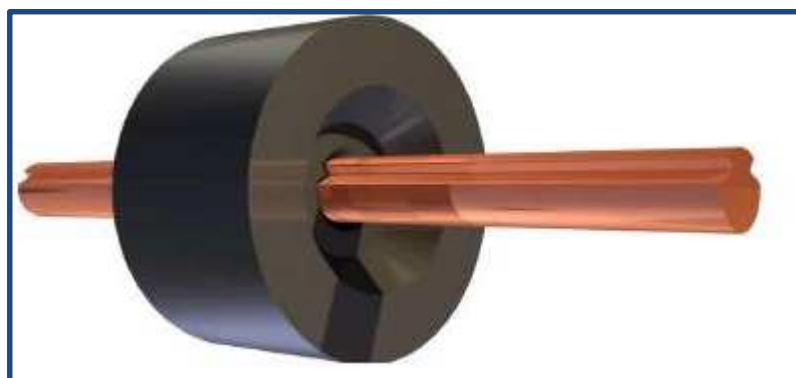


Figura 5.7: Esquema del procés de trefilat del FDCR

A continuació es mostra un esquema del procés de fabricació de fil de contacte ranurat a La Farga Lacambra.

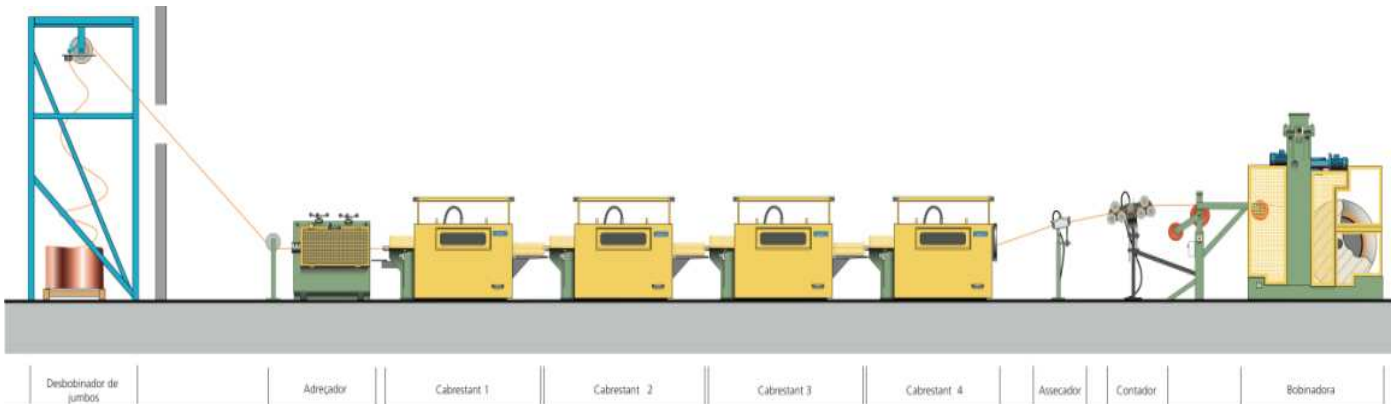


Figura 5.8 Procés de fabricació fil del fil de contacte ranurat LFL.

5.7 Parts constitutives de la catenària

La catenària és un conductor elèctric complex format per tres conductors i és l'element encarregat de subministrar corrent elèctrica als trens i tramvies.

El conjunt estructural de la catenària té com a objectiu garantir un correcte subministrament elèctric als trens. Aquest subministrament es realitza a través del fil de contacte ranurat, que transmet l'electricitat a l'estar en contacte amb el pantògraf.

A la següent imatge es mostren les parts constituents d'una catenària:

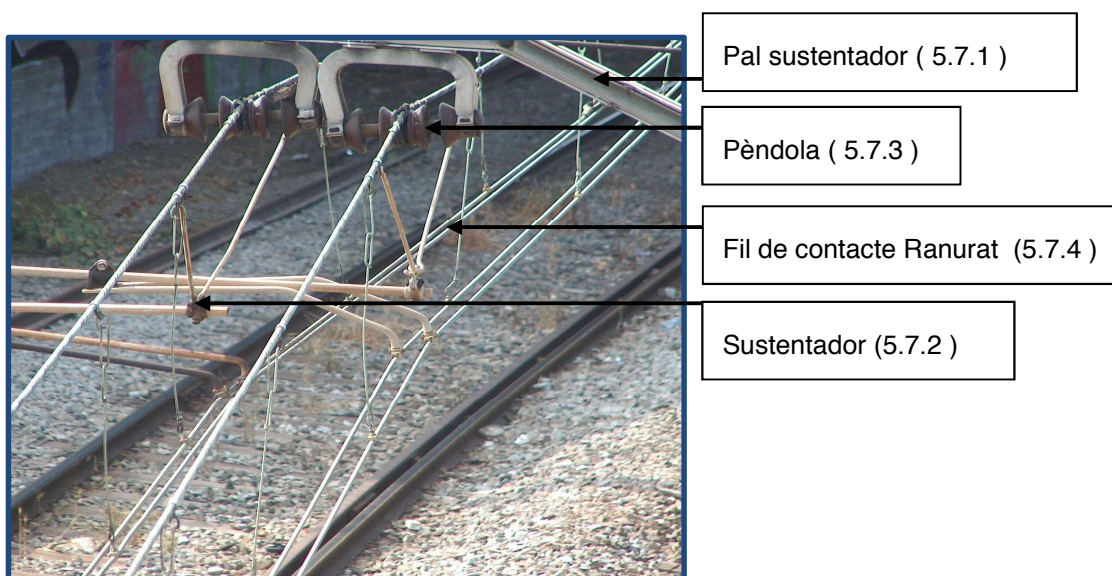


Figura 5.9: Parts constituents d'una catenària apta per 160 km/h.

5.7.1 Pal sustentador

El pal sustentador, és l'element que subjecta tot el conjunt en la posició fixada de treball. Sobre el pal sustentador recau la major part de l'esforç estructural requerit per suportar el conjunt de la línia elèctrica d'alimentació dels ferrocarrils.

5.7.2 Fil sustentador

El fil sustentador és el que pròpiament té forma de catenària, ja que és un cable que penja entre els pals sustentadors. Sota l'efecte del seu propi pes, el del fil de contacte i les pèndoles, adopta la forma de catenària.

Està format per un conjunt trenat de cables(un fil central, sis fils que envolten aquest fil central i dotze fils que envolten el conjunt anterior) i acostuma a tenir una secció compresa entre 95 i 120mm². Està sotmès a esforç mecànic contínuament.

5.7.3 Pèndola

Les pèndoles són uns cables de 16 o 25 mm² de secció, instal·lats verticalment i que uneixen el cable sustentador amb el fil de contacte. La seva missió és conduir el corrent elèctric des del sustentador fins al fil de contacte.

5.7.4 Fil de contacte ranurat (FDCR)

El fil de contacte ranurat és el fil que via el contacte mòbil que representa el pantògraf, subministra el corrent elèctric al comboi.

El pantògraf és una peça de grafit ubicada a la part superior del tren i és el captador mòbil de corrent elèctric del motor del tren . El pantògraf està dotat d'una molla que manté la connexió elèctrica del motor amb el fil de contacte, malgrat que l'alçada del fil de contacte no sigui estrictament constant. El pantògraf no forma part del sistema de catenària ja que està ubicat sobre un comboi.

El fil de contacte està tensat, no flexa sota el seu propi pes, és horitzontal i està a una alçada constant sobre l'eix de la via. Una de les principals causes de fallida d'aquest fil de contacte és degut a que pateix desgast mecànic per la fricció del pantògraf. Els mals contactes o una elevada densitat en la circulació de combois agreugen aquest desgast.

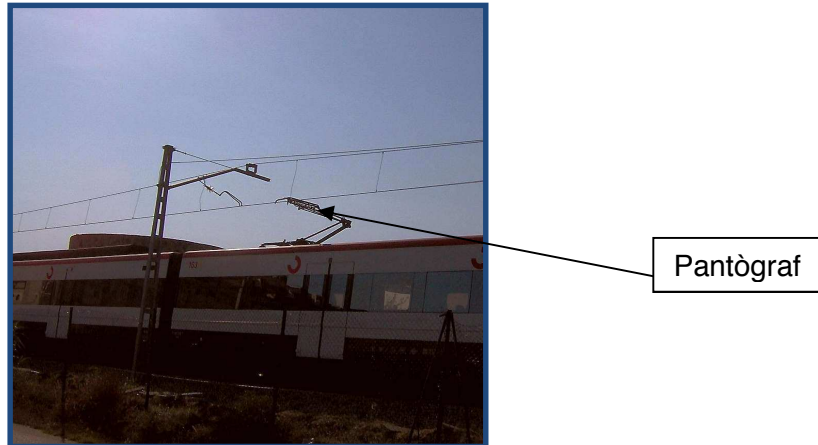


Figura 5.10: Detall de pantògraf en servei

La seva secció normalitzada (UNE 50149) pot ser de 107, 120 o 150 mm², amb dues possibles geometries, circular i ovalada. A continuació es mostren 2 FDCR reals amb les 2 geometries possibles:

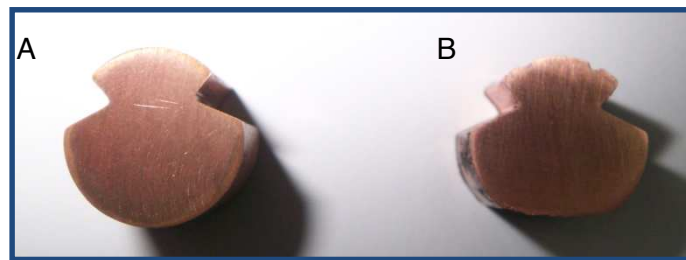


Figura 5.11: Detall de seccions FDCR. A) circular B) ovalada

5.8 Característiques en servei de la catenària

Les catenàries durant la seva vida en servei estan sotmeses a grans intensitats, superiors a 2.000 Ampers durant intervals de temps superiors als 2 minuts. També estan exposades a l'acció dels elements meteorològics (pluja, vent, ...) i pateixen vibracions i flexions degudes al pas dels pantògrafs. Per aquests motius són necessàries unes certes prestacions mecàniques així com resistència a la corrosió.

Cada una de las parts que componen la catenària, les quals han estat anteriorment senyalades, està sotmesa a condicions de treball diferents, així doncs les condicions de treball per a cada una d'elles són les següents.

5.8.1 Fil sustentador

El fil sustentador és el que transporta la major part del corrent elèctric. Està sotmès a una lleu fatiga, ja que està en tensió constant donat que ha de sustentar el pes del fil de contacte i les pèndoles. Pot escalfar-se per efecte Joule degut al pas de corrent. El material ha de presentar unes bones prestacions elèctriques i mecàniques.

5.8.2 Pèndoles

Les pèndoles estan sotmeses de forma puntual a demandes molt elevades de corrent, es a dir, a cicles d'escalfament i refredament continus . Per tant el material necessita una elevada temperatura de recuit i una bona conductivitat elèctrica. Les prestacions mecàniques en aquest element en concret no són excessives donat que no està sotmès ni a desgast per fricció ni a elevades forces de tracció.

5.8.3 Fil de contacte ranurat (FDCR)

Per garantir una uniformitat en el contacte entre pantògraf i el propi fil de contacte aquest ha de presentar les mínimes microondulacions possibles. Per aquest motiu, el FDCR es tensa sota una certa càrrega, de forma que pateix una càrrega mecànica contínua durant tota la seva vida en servei. Aquesta càrrega, que també afecta al sustentador, en funció de la velocitat de servei de la línia en que està instal·lada, varia ja que cal tenir present un fenomen bàsic en el comportament de la catenària: l'ona que crea el moviment del pantògraf en el fil de contacte. Aquesta ona té una velocitat de propagació (una mena de freqüència natural del sistema) que ha de ser molt més gran que la velocitat del pantògraf (tren) ja que altrament el fil de contacte entraria en un estat de ressonància que pot dur associat la destrucció del sistema vibrant (la catenària).

L'expressió que dona la velocitat de propagació de l'ona pel fil de contacte és:

$$C \text{ (m/s)} = \sqrt{[\text{carrega del fil (N)}/\text{Densitat lineal del fil (kg/m)}]} \quad \textbf{Equació 5.1}$$

En el cas d'una línia de baixa velocitat (fins a 160 km/h), $\sigma=100 \text{ N/mm}^2$ i $\rho=0,96(\text{kg/m})$. Per a una catenària de Cu-ETP (107mm^2 de secció) la velocitat de propagació $C = 105.6 \text{ m/s}$ (380 km/h).

Per determinar la màxima velocitat d'utilització d'una catenària i tenint en compte la velocitat de propagació de l'ona, es defineix el factor Doppler (α) com:

$$\alpha = (c-v)/(c+v)$$

Equació 5.2

On v és la velocitat del pantògraf (la velocitat del tren) i c és la velocitat d'ona definida en l'Equació 5.1

El factor Doppler (α) val zero quan la velocitat del pantògraf és igual a la velocitat d'ona. Per tant si el factor Doppler és major que 0,15 s'evita tota possible ressonància, el que implica que la velocitat màxima de la línia sigui de: $v < 0,74c$.

Si es vol un FDCR per a una línia d'alta velocitat, la tensió ha de ser gran. Per exemple per una velocitat de 330km/h, la velocitat d'ona és superior a 450 km/h i això implica que la tensió ha de ser superior a 1,40 vegades la tensió per 160 km/h (velocitat de línies de baixa velocitat)

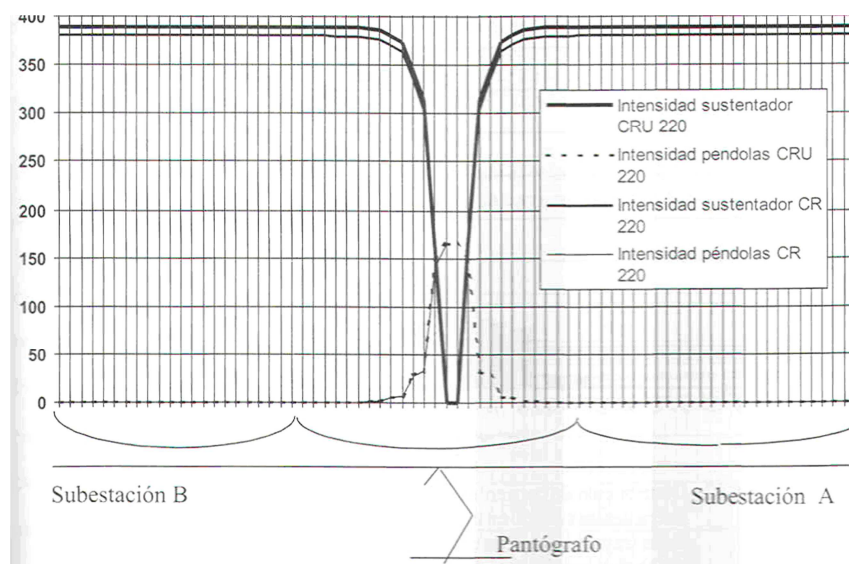


Figura 5.12: Distribució d'intensitats en un fil sustentador en funció de la posició del pantògraf.

La figura 5.12 mostra la gràfica de la distribució d'intensitats en el fil sustentador (la del fil de contacte és la inversa). Aquesta gràfica ens mostra que la conductivitat del fil de contacte és menor que la del sustentador i això fa que la majoria de la intensitat circuli pel cable sustentador fins arribar al punt de contacte entre el pantògraf i el fil de contacte. En el punt de contacte el fil sustentador no té intensitat, tota la intensitat circula per les pèndoles fins al fil de contacte.

La presència de grans intensitats durant temps que poden ser llargs per exemple, arrancades des del repòs o ascensió de forts pendents, porta via l'efecte Joule, a l'augment de la temperatura del conductor que pot donar lloc a recuits no desitjats, per

tant a una pèrdua de propietats mecàniques degut a la termofluència. La termofluència és un fenomen associat a la viscoelasticitat que tant el Cu-ETP com els seus aliatges presenten en major o menor grau.

Un altre paràmetre a tenir en compte en un fil de contacte, és el desgast. El desgast en els fils de contacte pot tenir lloc degut a diferents causes.

- El desgast que pateix degut al pas dels pantògrafs, que mantenen el contacte gràcies a una molla; sent la força de contacte d'uns 300 N. Els pantògrafs disposen d'una pletina anomenada "tableta", que pot ser de coure o grafit, que fa el contacte elèctric amb el fil de contacte. El fregament entre pantògraf i FDCR, provoca un desgast tant del FDCR com també del pantògraf.
- Un altre factor de desgast són els arcs elèctrics que es formen entre el FDCR i el pantògraf, en instants en els quals desapareix el contacte, degut per exemple a una microondualció del FDCR, o a una variació de la distància entre el rail del tren i la del FDCR. L'arc creat, provoca l'augment de temperatura d'una zona molt localitzada del FDCR, la qual pot arribar a oxidar-se. Aquest òxid, se sol desprendre, degut al fregament produït per el següent pantògraf, provocant així el desgast del FDCR.

En les figures 5.13 i 5.14 es mostra el desgast d'un FDCR:



Figura 5.13: Detall del desgast d'un FDCR



Figura 5.14: Desgast real d'un fil de contacte instal·lat a les proximitats de Barcelona

Com es pot observar en les figures anteriors, com a conseqüència del desgast es redueix de manera important la secció del fil de contacte (>50%), per tant augmenta la tensió a la que està sotmès, amb perill de trencada i s'augmenta la seva resistència elèctrica i per tant també, les pèrdues de corrent per efecte Joule.

El desgast es mesura per volum de material perdut per unitat de distància. A la pràctica, la mesura real del desgast es mesura com la pèrdua d'alçada amb el pas de pantògrafs. Aquesta pèrdua resulta ser experimentalment marcadament lineal amb el pas de pantògrafs. La pèrdua de secció és aproximadament quadràtica amb el pas de pantògrafs.

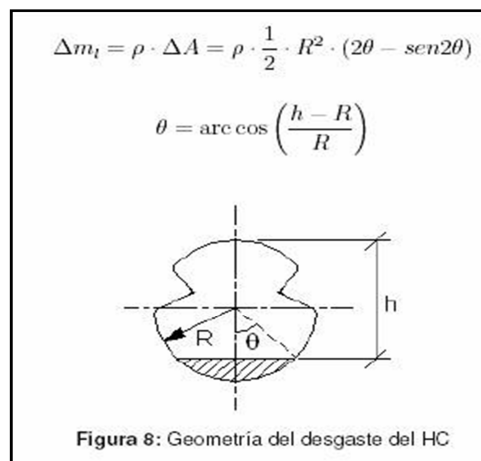


Figura 5.15: Esquema del desgast del FDCR

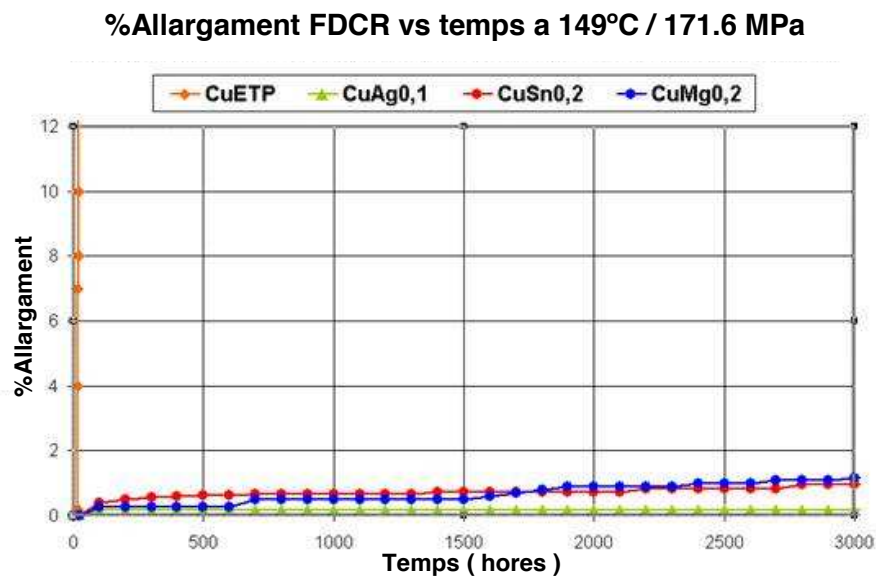
Alhora, el FDCR, ha de mantenir les seves propietats mecàniques durant la seva vida útil, ja que ha d'estar sotmès a elevades temperatures ($T > 200^{\circ}\text{C}$) puntualment.

Aquí és on entren en joc les diferents composicions en el FDCR. L'adició d'elements dopants a diferents concentracions o la poliaddició de microdopants a un dopant de base, poden modificar sensiblement les propietats del coure, obtenint aliatges amb

prestacions mecàniques molt superiors sense disminuir excessivament la conductivitat elèctrica del material.

Els aliatges més utilitzats com a fil de contacte ranurat son el CuSn0,2 i el CuAg0,1 per a línies ferroviàries tradicionals. L'aliatge CuMg0,2 degut a les seves magnifiques prestacions en quan a propietats mecàniques sol ser la alternativa utilitzada per a línies d'alta velocitat.

A continuació es mostra una comparativa dels diferents materials utilitzats en els sector a fluència:



Gràfic 5.16: Comparativa de materials a fluència

Com es pot observar en la figura 5.16, el CuAg0,1, és el material que presenta una millor resposta a fluència, tot i que els resultats són molt semblants als del CuSn i CuMg. Alhora, es pot observar com el CuETP, és el material que presenta una pitjor resposta a fluència, ja que el material arriba a trencar, a les poques hores d'iniciar l'assaig.

A partir del descrit fins el moment, les principals característiques que es demanen a una catenària són:

1. Capacitat de suportar càrrega de forma continua
2. Mínim desgast possible
3. Punt de recuit o recristal·lització alt
4. Alta conductivitat elèctrica
5. Baixa fluència per Creep

El cost dels diferents aliatges descrits és molt variable, essent aquest un dels principals problemes a l'hora de gestionar l'elecció d'alguna d'aquestes alternatives. Per molt competitives que siguin les propietats que ofereixi, l'estret rang de preus que permet el mercat, obliga a obtenir aliatges a molt baix cost, d'altra forma difícilment s'aconseguiria el nivell de vendes necessari per garantir la rendibilitat de la inversió.

6. Estat de l'art

En l'actualitat, en el mercat hi ha diversos materials aptes per ser utilitzats com a FRCD. Els materials utilitzats són:

6.1 Coure (CuETP)

El coure CuETP s'utilitza majoritàriament per a les línies convencionals (baixa velocitat), és el material que presenta major conductivitat elèctrica, però pel contrari, és el material que es desgasta amb major facilitat. Aquest serà el material base sobre el que s'addicionaran diferents productes al·leants que permetin obtenir un producte final dins els marges exigits per la normativa i que al mateix temps permeti la seva adaptació al procés industrial de la empresa sol·licitant així com un marge comercial suficient com per competir amb la resta de productes actuals del mercat.

6.2 Coure plata (CuAg0.1)

La plata s'addiciona al coure amb un contingut del 0,1% (0,08 – 0,12%) per tal d'incrementar la temperatura de recuit del coure, i d'obtenir una major estabilitat tèrmica sense perjudicar les propietats mecàniques ni elèctriques.

Aquest producte té com a principal defecte l'elevat cost que suposa la utilització d'un metall preciós com la plata amb preus entorn als 800 euros per kilogram. Degut al percentatge de material requerit per a la obtenció d'aquest aliatge el cost directe sobre el kilogram de producte final estaria entorn als 0,8 euros/kilo. Així doncs i tenint en compte que el preu del coure oscil·la entre els 7 i els 9 euros per kilogram, la utilització de plata com a agent dopant suposa un augment del cost de les matèries primeres entorn a un 10%.

6.3 Coure estany (CuSn0,2)

L'estany s'addiciona al coure amb un contingut del 0,2% (0,15 – 0,55%), per tal d'augmentar la resistència a la tracció del material i en conseqüència poder augmentar la velocitat de circulació dels trens. Aquest aliatge, també millora les propietats de recuit, tot i que perjudica molt la conductivitat elèctrica. Alhora s'obté una millor resposta al desgast.

El CuSn0,2 seria la alternativa econòmicament més viable entre les diferents propostes actualment en el mercat (el cost de l'estany és 17 euros/kg segons LME al gener del 2014)

6.4 Coure magnesi (CuMg0.5)

El magnesi s'addiciona al coure amb un contingut del 0,5% (0,4 – 0,7%) i s'utilitza a l'igual que l'estany per millorar les propietats mecàniques i de recuit del material, tot i que en perjudica molt la conductivitat elèctrica. Un altre avantatge de l'aliatge de coure-magnesi, és que presenta unes millors prestacions a desgast del material. Aquest aliatge és l'utilitzat en línees d'alta velocitat (velocitat >220 km/h).

Fins als anys 90 s'usava també l'aliatge CuCd1%, ja que oferia unes prestacions de conductivitat elèctrica i resistència a la tracció molt bones, però per causes mediambientals degut a la seva toxicitat, es va prohibir la utilització d'aquest aliatge per al mercat ferroviari.

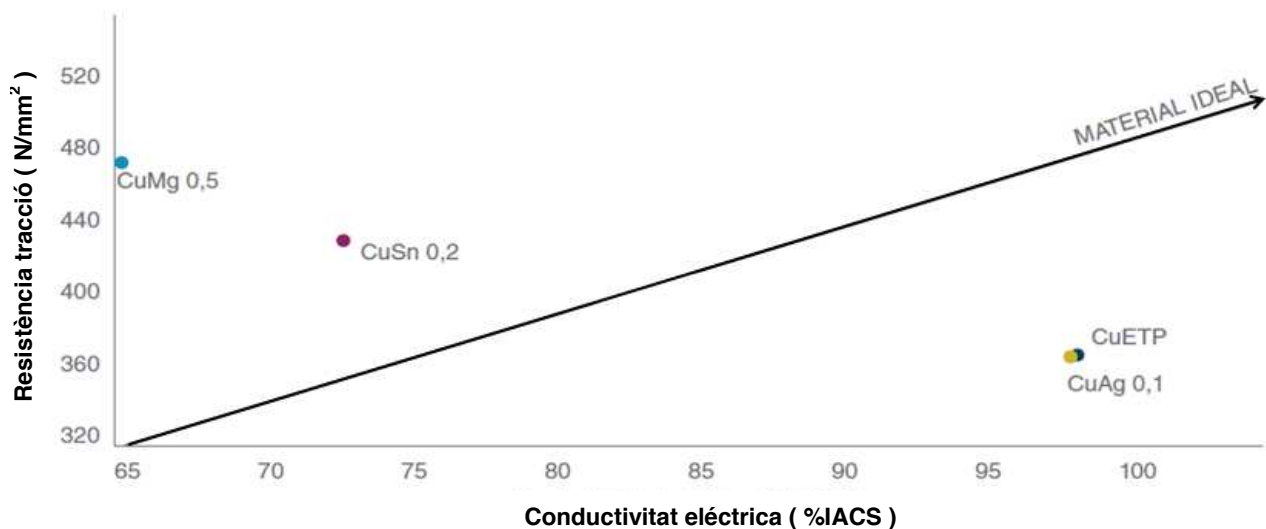
Per poder realitzar l'addició del magnesi al coure, cal una atmosfera lliure d'oxigen, raó per la qual, degut a la complexitat que afegeix aquest fet en la fosa del material, el cost productiu d'aquest aliatge és netament superior al de totes les altres alternatives.

A continuació es mostra una taula comparativa de les diferents propietats per a cada aliatge:

Propietat	Unitat	CuETP	CuAg0,1	CuSn0,2	CuMg0,5
Conductivitat elèctrica	%IACS	97	97	72	62
Càrrega màxima	Kn	52	52	61	68
Resistència tracció	MPa	360	360	420	470
%Allargament	-	6	6	5	4
Límit elàstic	MPa	350	350	390	440
Temperatura recuit	°C	200	340	360	400

Taula 6.1: Propietats dels diferents aliatges de Cu utilitzats en el sector ferroviari

Tant la resistència a la tracció com la conductivitat elèctrica són dos paràmetres d'importància vital de cara a avaluar la viabilitat d'un aliatge com a FDCR en el sector ferroviari. Així doncs un gràfic on es presentin els diferents aliatges i els seus respectius valors en aquestes dues variables ens permet identificar ràpidament la qualitat de cada una de les alternatives.



Gràfic 6.1: Gràfic comparatiu de la conductivitat elèctrica vs la resistència a la tracció dels diferents aliatges utilitzats en el sector ferroviari

S'observa en el gràfic anterior com actualment hi ha dues aproximacions possibles de cara a suplir la demanda de fil de contacte ranurat. La primera seria la que ofereixen el CuETP i el CuAg0,1, una gran conductivitat elèctrica en contraposició a unes baixes prestacions mecàniques. L'altra aproximació seria la que ofereixen el CuSn0,2 i principalment el CuMg0,5, unes altes prestacions mecàniques en detriment de la conductivitat elèctrica.

Ambdues aproximacions comporten problemes importants de cara al client. Si utilitza CuETP o CuAg0,1 es veurà forçat a substituir el fil de contacte molt sovint degut al seu elevat desgast, mentre que si utilitza CuSn0,2 o sobretot CuMg0,5 el consum elèctric de la via ferroviària serà molt elevat degut a la baixa conductivitat.

Un exemple d'aquests problemes el podem trobar en la recent decisió del Govern xinès de cara a no utilitzar CuMg0,5 en les seves noves línies ferroviàries d'alta velocitat degut a que el sobrecost que suposa no és acceptable per a línies ferroviàries de milers de kilòmetres de longitud.

Així doncs resulta evident l'oportunitat de mercat existent per a un producte que aconsegueixi combinar una conductivitat elèctrica raonablement elevada junt amb unes prestacions mecàniques suficients com per garantir que les futures substitucions del FDCR degut al desgast es realitzaran en un marge temporal adequat.

7. Metodología experimental

A continuació es detallaran els diferents passos realitzats en l'apartat experimental del projecte, on ha calgut tant seleccionar els possibles agents aleants, com avaluar les propietats dels diferents aliatges obtinguts, així com assegurar que la seva composició química era la desitjada.

7.1 Selecció de materials aleants.

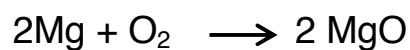
Degut al fet que els resultats d'aquest projecte han de ser aplicables a un producte comercialitzable cal tenir en compte tant les prestacions a nivell tècnic de l'aliatge resultant com els costos econòmics dels elements aleants seleccionats de cara a obtenir un producte competitiu en l'actual marge de preus que ofereix el mercat.

De cara a optimitzar el disseny d'experiments per tal de no malgastar temps i esforç amb aliatges que no compleixin ja sigui els requisits tècnics, ja sigui els econòmics i per tal de no oblidar cap element susceptible de oferir bons resultats, el criteri en la selecció de materials, ha estat el de descartar paulatinament tots aquells materials que no compleixin algun dels requeriments, per obtenir finalment un ventall el més ampli possible dins els criteris tècnics i econòmics requerits.

Així doncs s'han definit cinc criteris de selecció a partir dels quals s'ha pogut descartar tots els elements no aptes per al seu ús com a agents aleants.

7.1.1 Criteris per a la selecció de materials.

- **Estat natural de l'element:** Només s'avaluaran elements en estat sòlid a temperatura ambient, degut al cost, complexitat i escassa solubilitat en coure que implicaria la utilització elements en estat líquid o gasós.
- **Reactivitat amb l'oxigen:** Degut a l'especificació bàsica marcada per l'empresa sol·licitant, l'aliatge s'ha de poder fondre i colar en presència d'oxigen (200 – 400 ppm). Elements com el magnesi queden descartats per aquesta condició al reaccionar de forma altament exotèrmica en estar en contacte amb l'oxigen en estat líquid.



- Per obtenir una referència visual i esquemàtica dels resultats de l'aplicació de les anteriors condicions per a la selecció de materials, s'ha procedit a descartar element per element en funció dels criteris de selecció obtenint el resultat que mostra la següent taula periòdica.

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra																

Taula 7.1: Classificació dels elements químics en funció dels criteris de selecció emprats

Blau: Reactius amb oxigen

Groc: elements en estat gasos

Gris: elements radioactius o tòxics

7.1.2 Comentaris als resultats mostrats en la taula periòdica.

Elements descartats per reactivitat elevada amb l'oxigen: Dues alternatives importants que ha calgut descartar han estat el magnesi i l'alumini, ambdós materials molt relacionats amb el transport d'energia elèctrica (Al) i en aliatges per a coure de catenària per trens d'alta velocitat (Mg).

Elements descartats per insolubilitat: el molibdè i el wolframi, elements utilitzats en aliatges fèrrics per a l'enduriment de l'acer, com per exemple a la hora d'obtenir blindatges per a vehicles militars, podien haver estat una alternativa per augmentar la duresa del Cu i millorar-ne les propietats mecàniques però al no ésser solubles en coure, han estat descartats.

Elements descartats per estat gasós: En principi cap dels elements en estat gasós semblava d'entrada una opció de cara a millorar les prestacions del CuETP.

Elements amb cost econòmic excésiu: És molt probable que elements com l'iridi, el rutheni, el paladi o l'or poguessin oferir prestacions o propietats molt interessants al aliar-se amb el CuETP, no obstant el seu elevadíssim cost els descarta com a una opció econòmicament viable.

Elements tòxics i radioactius: En aquest cas, l'element descartat que més opcions tenia de millorar les prestacions del CuETP és el cadmi que degut a canvis en la normativa mediambiental ja no es pot utilitzar degut a la seva toxicitat.

Aquesta metodologia de treball, ha permès descartar la major part de possibles elements dopants, reduint la cerca d'alternatives a un grup reduït. Gràcies a aquest fet, amb un nombre reduït d'experiments s'ha pogut avaluar un ventall d'alternatives significatiu essent totes potencialment factibles de cara a la seva implantació a nivell industrial, sense malgastar temps i esforç en aliatges que si bé podien oferir prestacions interessants o costos econòmics reduïts, la seva utilització futura hagués estat inviable.

Degut a les característiques comercials d'aquest projecte, la importància del cost econòmic és segurament la més rellevant. És per aquesta raó que conèixer detalladament el preu de mercat de les diferents alternatives ha estat un dels primers passos a realitzar.

Alhora dels elements seleccionats, l'empresa sol·licitant en fa una segona selecció en funció de la seva col·labilitat en les seves instal·lacions.

En la taula que es mostra a continuació es detalla el preu de cada un dels possibles agents aleants a data de 27/01/2013.

Material	Cost (\$/kg)
Cu	6,43
A	1,10
B	1,81
C	14,42
D	16,00
E	24,61
F	146,00
G	1.107,40

Taula 7.2: Cost econòmic dels diferents agents aleants.

Els preus senyalats s'han obtingut de les pàgines web de referència a la hora de conèixer els preus de les matèries primeres en el mercat mundial www.kitco.com i London Metal Exchange, www.LME.com.

Un cop seleccionats els elements es van determinar les concentracions en les quals es durien a terme les colades.

7.1.3 Límits de concentració aplicables

Els criteris a seguir, es varen determinar d'acord amb els valors límits de concentració que es poden processar a les instal·lacions de La Farga Lacambra.

Així, les els límits definits per a les concentracions de treball finals varen ser:

- F entre 150 i 200 ppm
- C entre 200 i 350 ppm
- B entre 10 i 100 ppm
- A entre 40 i 60 ppm

- E entre 200 i 400 ppm
- D: Fins a 2500 ppm per a tal de buscar sinèrgies entre aquest element i els elements seleccionats
- G: Fins a 1000 ppm per tal de buscar sinèrgies entre aquest element i els elements seleccionats

Les diferents mostres dels elements d'aliatge utilitzats estaven en forma de pols metàl·lica. Les mostres de pols metàl·lica d'aquests elements varen ser subministrades per l'empresa La Farga Lacambra.

7.2 Obtenció dels aliatges

L'eix en torn del qual gira aquest projecte de recerca, és la obtenció de diferents aliatges aplicats al coure ETP.

A continuació es descriu la metodologia usada per dur a terme els diferents aliatges objecte d'aquest projecte.

7.2.1 Forn d'inducció

Les fusions es varen fer en un forn d'inducció de colada al buit VC-100, de l'empresa Indutherm. Aquest forn té una temperatura de treball màxima de 1200°C i permet treballar amb atmosferes de nitrogen o argó. La següent imatge mostra del forn d'inducció utilitzat:

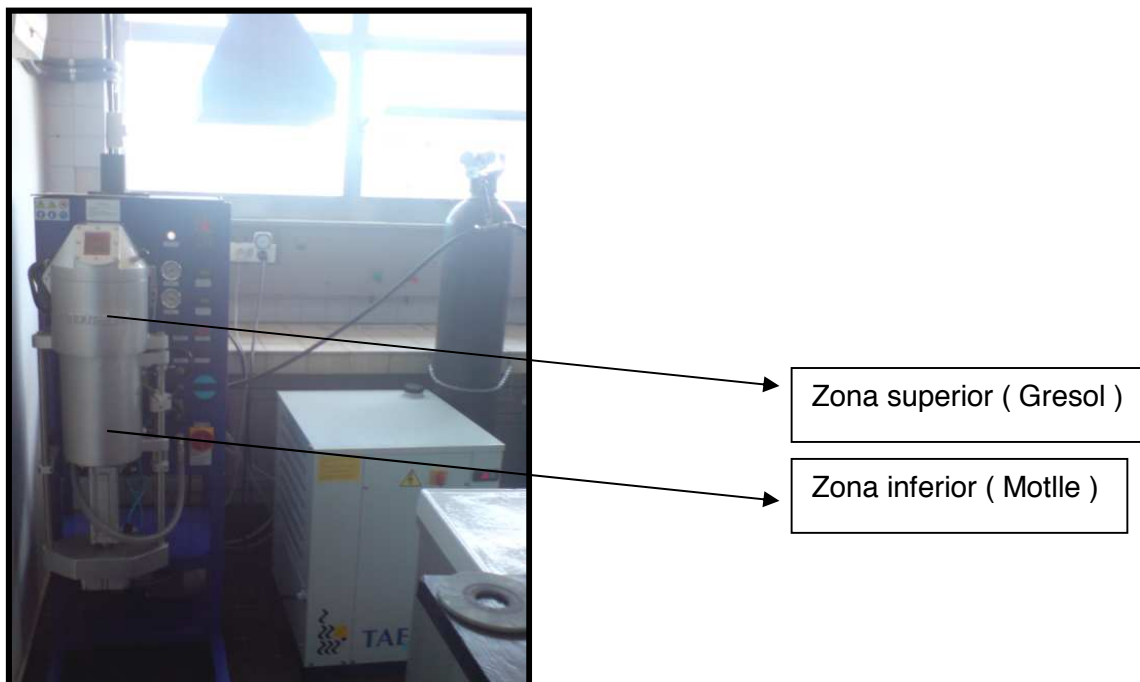


Figura 7.1: Detall del forn utilitzat VC-100.

Aquest forn consta de 2 zones, la primera on hi ha el gresol, és on es produeix la fusió del caldo, i la segona és on es situa el motlle on es cola el caldo i on té lloc la solidificació. Les dues zones poden estar al buit.

L'homogeneïtzació de l'aliatge un cop fos el coure i afegit i/o afegits els elements aleants, es realitza gràcies a les corrents de d'inducció generades durant els impulsos electromagnètics generats pel forn.

El gresol del forn és de grafit, per tant les mostres estaran colades en absència d'oxigen.

Un cop fosa la mostra i afegits els elements aleants, el caldo cau sobre un motlle cilíndric que donarà la forma final a la proveta.



Figura 7.2: Detall del motlle de colada.

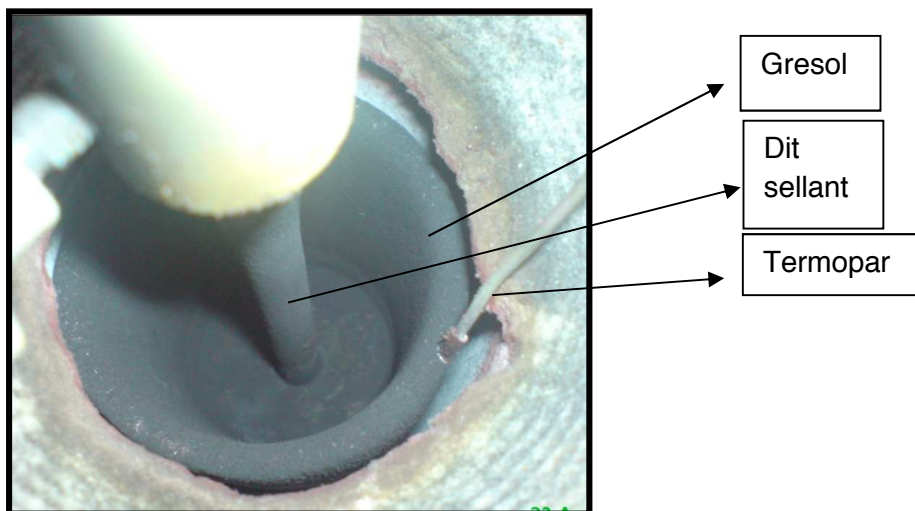


Figura 7.3: Detall del gresol del forn

La figura 7.3 mostra el detall del gresol del forn on s'han realitzat les fusions. El dit sellant, té la funció de tancar el forat inferior del gresol, i evitar així que el caldo caigui al motlle de solidificació prematurament. Aquest dit sellant, està connectat a un sistema hidràulic, el qual permet aixecar el dit sellant en el moment desitjat.

7.2.2 Condicions experimentals

Les condicions de les fusions varen ser:

- Pes de la mostra 300 gr
- Temperatura de colada 1150°C
- Temperatura del motlle 400°C
- Temps de buit un cop introduït el motlle: 2 minuts
- Atmosfera protectora: N₂

El motlle de solidificació, s'escalfa a 400°C, per evitar que el “ caldo “ provinent del gresol solidifiqui a l'instant en que entri en contacte amb el propi motlle. Si la solidificació es realitzés de forma instantània, l'aparició de defectes estructurals en les mostres faria impossible avaluar la seva conductivitat elèctrica i afectaria de forma significativa les seves propietats mecàniques.

Ahora, realitzem el buit durant 2 minuts, per a assegurar-nos que no hi ha oxigen en la zona de solidificació, el qual ens oxidaria el coure i ens faria variar les propietats

7.2.3 Descripció del procés de colada

El procés seguit per realitzar les fusions consta de les següents etapes.

- Es pesen 300gr de coure aproximadament. El coure utilitzat és un coure FRHC estàndard, subministrat per l'empresa La Farga Lacambra
- Es talla en trossos de 5 cm de llarg i s'introdueix el coure dins el gresol del forn i s'encén el forn.
- Un cop fos el coure, s'obre el forn i s'afegeixen els elements aleants.
- Es torna a tancar el forn i es torna a fer una sobrepressió de nitrogen per a tenir de nou atmosfera inert.
- Es deixa el caldo durant 3 minuts per tenir obtenir una bona homogeneïtzació.
- Al cap d'un minut d'afegir els elements aleants, s'introdueix el motlle de solidificació dins la zona de colada, prèviament escalfat durant 1 hora a 400°C.

- S'espera 2 min per tenir de nou una atmosfera de nitrogen dins la zona de colada.
- Un cop hem esperat aquests 2 min, aixequem el dit sellant del forn, així el caldo cau sobre el motlle.
- Abans de treure el motlle, esperem a que el gresol estigui a 800°C, per assegurar-nos que la mostra estigui solidificada.

A continuació es mostra la imatge de les provetes obtingudes directament de colada:



Figura 7.4: Imatge de les provetes obtingudes

7.3 Determinació de les propietats

A continuació es detalla la metodologia utilitzada per determinar la composició química, la conductivitat elèctrica i la temperatura de recuit.

7.3.1 Determinació de la composició química

Per a la determinació de la composició química es va utilitzar un espectròmetre d'emissió òptica (SPECTROLAB-S) , ubicat en les instal·lacions de l'empresa La Farga Lacambra.

Per a la utilització d'aquest espectròmetre, és necessari que les mostres presentin una superfície ben polida i exempta de protuberàncies o inclinacions que impedeixin mantenir la distància entre la mostra i l'elèctrode de l'equip. Alhora la superfície a analitzar ha d'estar exempta de greix, taladrina o òxid.

L'equip SPECTROLAB-S funciona, provocant un arc elèctric entre la superfície de la proveta i un elèctrode, el qual crea un plasma de la mostra a analitzar. Un cop creat aquest plasma, els àtoms de la superfície de la mostra estan en un estat d'excitació, en el qual, emeten radiacions ultraviolades o en l'espectre visible. Aquestes emissions,

que són característiques de cada element són les que permeten a l'equip conèixer la concentració de cada element present en la mostra.

Per fer-ho, l'equip, un cop excitats els àtoms, fa passar la llum per un prisma, per tal de dispersar la llum i la separa-la segons la seva longitud d'ona. Un cop separada la llum segons cada longitud d'ona, l'equip disposa de fotodetectors calibrats per a cada longitud d'ona i relacionar així la intensitat de llum rebuda amb la concentració de l'element dins la mostra analitzada.



Figura 7.5: Espectròmetre d'emissió òptica SPECTROLAB-S.

Per fresar la mostra i obtenir la superfície apta per ser analitzada, s'utilitza una fresadora ubicada dins les instal·lacions de l'empresa:



Figura 7.6: Detall de la fresadora utilitzada (esquerra) i de la superfície obtinguda (dreta)

La fresadora utilitzada és una fresadora CNC INTERWOOD ARM amb una longitud de 600 i convertidor. La seva funció ha estat polir la superfície de forma adequada, procés que es podia realitzar amb diversos útils però que per raons de disponibilitat s'ha considerat el més adequat en el aquest cas.

7.3.2 Determinació de la conductivitat elèctrica

Donades les dimensions de la proveta a analitzar, el mètode seleccionat per a determinar la conductivitat elèctrica, és a través de l'equip *Sigma-test*, que està disponible a les instal·lacions de l'empresa La Farga Lacambra

Aquest equip disposa d'un palpador de 13mm de diàmetre, amb 4 terminals, 2 per a crear una diferència de potencial i els 2 restants per mesurar aquesta diferència de potencial. Coneixent la intensitat de corrent que fa passar l'aparell i la diferència de potencial mesurat, aplicant la llei d'Ohm, es pot determinar la resistivitat elèctrica. Un cop coneguda la resistivitat, fàcilment es determina la conductivitat de la mostra, ja que la resistivitat és la inversa de la conductivitat.

L'equip té una precisió de $\pm 1\%$ IACS

A continuació es mostra una imatge de l'aparell *Sigma-test*:



Figura 7.7: Detall d'una mesura realitzada amb l'equip Sigma-test

7.3.3 Determinació de la temperatura de recuit

La deformació en fred dels materials provoca canvis en la seva microestructura, augmenta les dislocacions i varia les seves propietats (augment de la tensió màxima, disminució de la ductilitat, disminució de la conductivitat elèctrica, ...)

A través de tractaments tèrmics, però, es poden restaurar les seves propietats inicials a través d'un seguit d'etapes: recuperació, recristal·lització i creixement de gra

- En la recuperació, s'allibera part de l'energia interna acumulada per les dislocacions i és l'etapa on es recupera la conductivitat tèrmica i elèctrica
- En la recristal·lització, es comencen a crear petits grans equiaxials, amb un baix nombre de dislocacions i és el punt on es recuperen les propietats mecàniques
- Durant l'etapa de creixement de gra, les propietats no es veuen modificades tot i que sí que hi ha un creixement de gra.

La temperatura de recuit, es defineix com aquella temperatura, a la qual, una mostra deformada un 80% en alçada, després d'un tractament tèrmic durant 1 hora, presenta una duresa de 75 HRF (segons referència nº 6 bibliografia).

Per determinar la temperatura de recuit de les mostres, es van seguir les següents etapes:

- Obtenció d'un cilindre de 10mm d'alçada i 8mm de diàmetre. Les provetes, es tallen en 4 parts i una de les parts, es porta a una empresa de mecanitzats, els quals retornen un cilindre de 8mm diàmetre i 15mm d'alçada. Un cop tenim aquest cilindre, amb una talladora metal·logràfica, es talla la mostra a 10mm d'alçada i amb les 2 cares paral·leles

Esquema de l'obtenció del cilindre de 8mm a partir de la proveta:

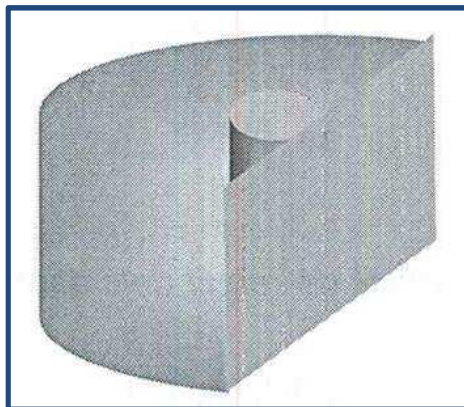


Figura 7.8: Esquema obtenció del cilindre de 8mm de diàmetre

L'altre útil necessari ha estat la talladora metal·logràfica que es mostra a continuació.



Figura 7.9: Detall de la talladora metal·logràfica

- Deformació en fred del cilindre obtingut des de els 10mm d'alçada inicial fins als 2mm d'alçada final per obtenir el 80% de deformació. La deformació es fa a través de les 2 cares per tal d'obtenir una deformació uniforme. Un cop realitzada aquesta deformació la duresa en Rockwell F és de 95 HRF aproximadament.

La deformació en fred es realitza mitjançant una premsa hidràulica



Figura 7.10: Detall la premsa utilitzada

- Realització dels tractaments tèrmics durant 1 hora a diferents temperatures en un forn mufla.
- Un cop fet el tractament, la mostra es trempa amb aigua i es determina la duresa HRF

- Es van fent augments de temperatura dels tractaments de 20°C progressivament, fins a obtenir una duresa inferior als 75 HRF. Els 75 HRF són la duresa del coure en estat recuit. La temperatura inicial de partida, va ser la de la mostra de Cu-FRHC sense alear.

A continuació es mostra una imatge del forn mufla on es van realitzar els tractaments tèrmics.



Figura 7.11: Imatge del forn mufla utilitzat

Aquest forn mufla, és el mateix forn utilitzat per a escalfar el motlle de solidificació a 400°C.

8. Resultats obtinguts.

Els resultats obtinguts dels 42 aliatges obtinguts es mostren en la taula següent.

Nº fusió	Conductivitat (%IACS)	T recuit (K)
1	96,5	658
2	95	718
3	95,5	658
4	93,5	643
5	99	653
6	95	633
7	95	648
8	95	658
9	92,5	638
10	96	658
11	95	638
12	95,5	658
13	98	638
14	92,5	668
15	92	668
16	92	713
17	90,5	668
18	90	668
19	87	648
20	91,5	738
21	84,5	733

Nº fusió	Conductivitat (%IACS)	T recuit (K)
22	91,5	698
23	93	638
24	84	653
25	91	633
26	90	658
27	95	763
28	78	688
29	92	738
30	92	703
31	92	673
32	81	678
33	79	668
34	86	643
35	92	668
36	75	668
37	89	668
38	96	668
39	96	653
40	85	698
41	96	653
42	84	698

Taula 8.1: Taula resultats obtinguts

- Com s'ha comentat anteriorment, una mostra de CuETP, presenta una conductivitat de 101.5%IACS i una temperatura de recuit de 200°C (473 K)

8.1 Calibració tècnica dels resultats obtinguts.

De cara a avaluar els resultats i tenint en compte que l'òptim en aquest cas, seria un material que tingues la major conductivitat elèctrica possible i la major temperatura de recuit possible, s'ha utilitzat com a referència, un coeficient fruit de multiplicar el valor de conductivitat elèctrica per temperatura de recuit al que s'ha anomenat coeficient tècnic.

Nº fusió	Cond. (%IACS)	T recuit (K)	C*T (%IACS*K)	Nº fusió	Cond. (%IACS)	T recuit (K)	C*T (%IACS*K)
1	96,5	658	63,50	22	91,5	698	63,87
2	95	718	68,21	23	93	638	59,33
3	95,5	658	62,84	24	84	653	54,85
4	93,5	643	60,12	25	91	633	57,60
5	99	653	64,65	26	90	658	59,22
6	95	633	60,14	27	95	763	72,49
7	95	648	61,56	28	78	688	53,66
8	95	658	62,51	29	92	738	67,90
9	92,5	638	59,02	30	92	703	64,68
10	96	658	63,17	31	92	673	61,92
11	95	638	60,61	32	81	678	54,92
12	95,5	658	62,84	33	79	668	52,77
13	98	638	62,52	34	86	643	55,30
14	92,5	668	61,79	35	92	668	61,46
15	92	668	61,46	36	75	668	50,10
16	92	713	65,60	37	89	668	59,45
17	90,5	668	60,45	38	96	668	64,13
18	90	668	60,12	39	96	653	62,69
19	87	648	56,38	40	85	698	59,33
20	91,5	738	67,53	41	96	653	62,69
21	84,5	733	61,94	42	84	698	58,63

Taula 8.2: Obtenció del coeficient tècnic dels aliatges obtinguts.

A l'ordenar de major a menor, estem classificant fonamentadament, els diferents aliatges estudiats en funció de les seua qualitat tècnica.

Els 8 aliatges amb millors prestacions tècniques segons aquest criteri ($C^*T > 64$) serien els següents:

Nº Mostra	Coeficient
2	68.21
5	64.65
16	65.60
20	67,53
27	72.49
29	67.90
30	64.68
38	64.13

Taula 8.3: Millors aliatges en funció del coef. tècnic.

Els aliatges amb millors propietats mecàniques són els utilitzats en les mostres numero 27 i 29. La mostra numero 2 presenta unes prestacions també molt interessants junt amb la mostra numero 20.

Els aliatges 20, 27 i 29 pertanyen a una mateixa família d'elements d'aleació, essent molt similars entre ells, mentre que l'aliatge dissenyat per a la mostra numero 2 utilitza com a dopant de base un element diferent i més econòmic.

Els resultats de la resta d'aliatges, no semblen molt interessants en principi, a falta de calibrar la seua viabilitat econòmica.

Per tal de comprovar la eficiència del coeficient tècnic utilitzat a la hora d'avaluar els diferents aliatges s'ha utilitzat un gràfic que relaciona la temperatura de recuit amb la conductivitat elèctrica, obtenint el següent resultat.

8.2 Detall dels experiments realitzats.

Un cop s'han determinat els 8 aliatges obtinguts amb millors prestacions tècniques a continuació es detallen els resultats experimentals obtinguts per a cadascun d'ells

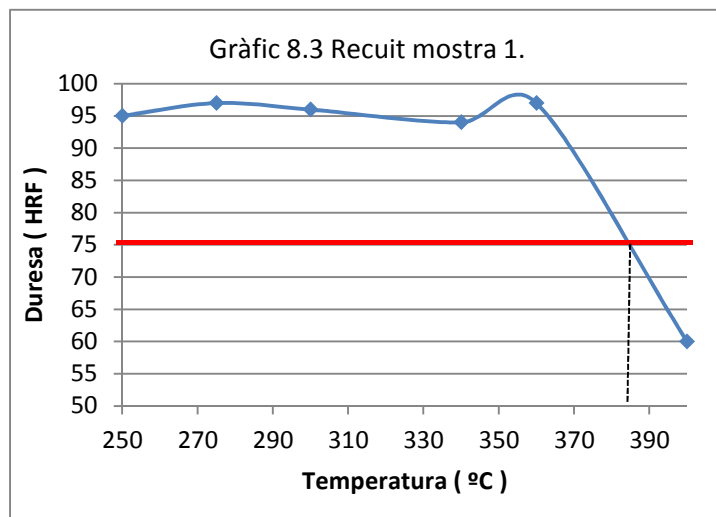
Per a cada aliatge s'exposa el numero de mostra, la temperatura de recuit, la duresa en funció de la temperatura i un gràfic que reflecteix la evolució de la duresa en funció de la temperatura.

Un comportament molt irregular en la pèrdua de duresa podria indicar inestabilitat en l'aliatge o algun tipus de defecte estructural degut a un error en la fusió i posterior colada.

8.2.1 Detall dels resultats de la mostra numero 1

Tot i no ser una dels aliatges seleccionats, es mostra la gràfica de recuit de la mostra nº 1, ja que és la mostra de referència:

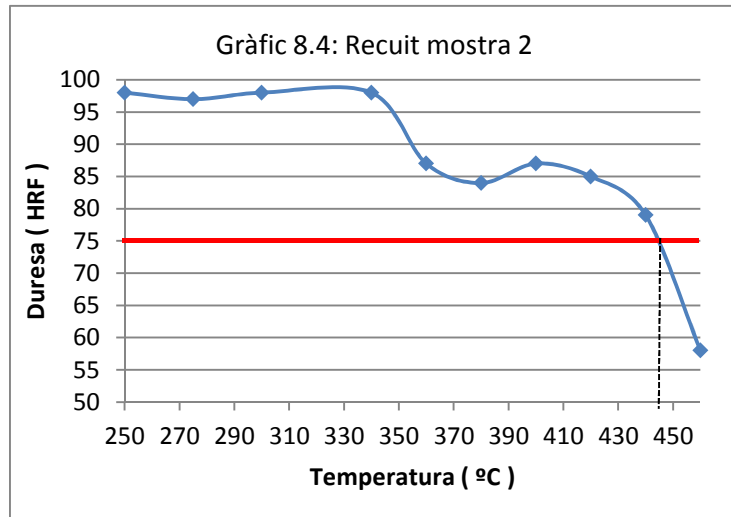
Mostra Nº	1
T recuit (°C)	385



Comentaris: La mostra numero 1 ofereix un resultat en la seva temperatura de recuit que mostra una millora significativa respecte al coure ETP. El resultat justificaria realitzar més experiments modificant la concentració de l'element en qüestió junt amb variacions en les concentracions minoritàries d'altres elements.

8.2.2 Detall dels resultats de la mostra numero 2

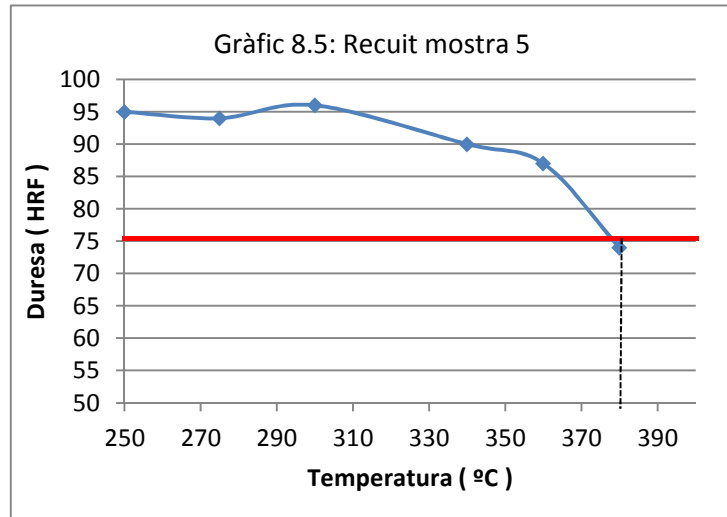
Mostra N°	2
T recuit (°C)	445



Comentaris: La mostra numero 2 ofereix unes propietats en quan a temperatura de recuit que milloren significativament les obtingudes en la mostra 1. Per aquesta raó es segueixen aplicant petites modificacions en els elements afegits al coure amb 'objectiu d'avaluar opcions que puguin millorar-ne les propietats mecàniques.

8.1.3 Detall dels resultats de la mostra numero 5

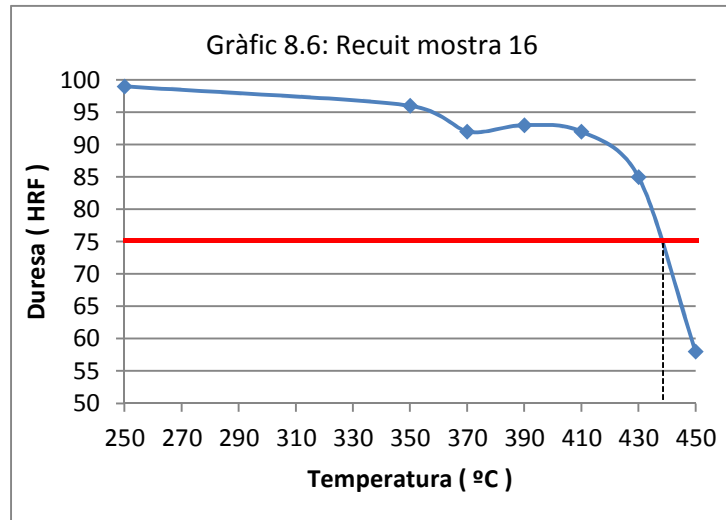
Mostra N°	5
T recuit (°C)	380



Comentaris: La mostra numero 5, tot i esser similar a la mostra numero 2 no ofereix unes prestacions millors, amb tot s'ha seguit evaluant possibles aleacions similars a aquestes amb l'objectiu de obtindre millores.

8.2.4 Detall dels resultats de la mostra numero 16

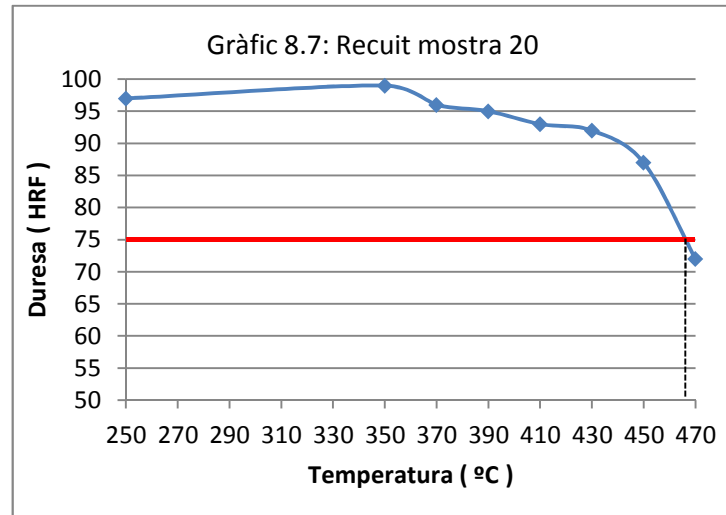
Mostra Nº	16
T recuit (°C)	440



Comentaris: La mostra numero 16 forma part d'un altra família d'aliatges que han estat dissenyats utilitzant com a element dopant majoritari un element diferent a l'utilitzat en la família de les mostres 1,2 i 5. La temperatura de recuit obtinguda és prou elevada com per realitzar experiments amb composicions similars, no obstant no s'ha pogut millorar el resultat obtingut per la mostra numero 16 amb altres aliatges similars.

8.2.5 Detall dels resultats de la mostra numero 20

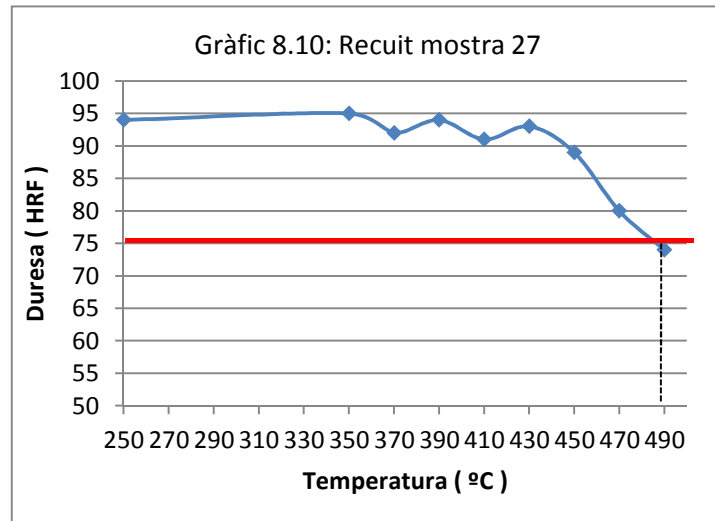
Mostra N°	20
T recuit (°C)	465



Comentaris: La mostra numero 20 és la primera d'una altra sèrie d'experiments realitzats utilitzant com a base un element dopant diferent als utilitzats en les famílies de mostres corresponents als aliatges 16 o (5,2 i 1). El resultat en quan a temperatura de recuit són molt interessants i es decideix realitzar una bateria d'experiments amb composicions similars.

8.2.6 Detall dels resultats de la mostra numero 27

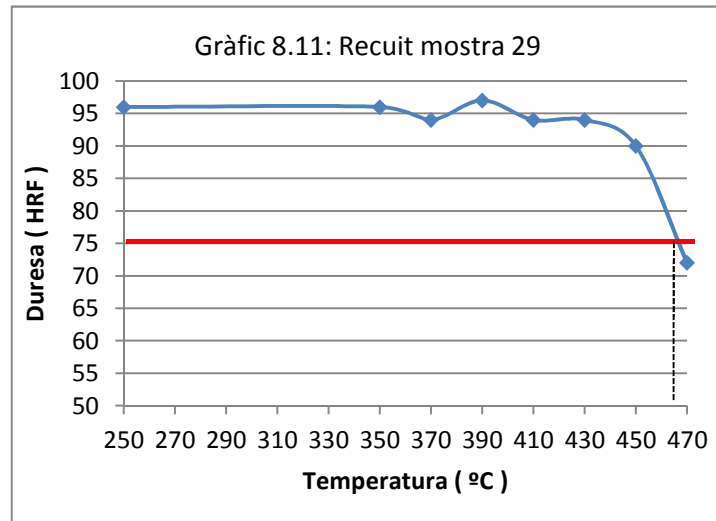
Mostra N°	27
T recuit (°C)	490



Comentaris: La mostra numero 27 és la mostra que ofereix unes prestacions més competitives en quan a temperatura de recuit, raó per la qual es procedeix a seguir treballant en petites modificacions en la composició amb l'objectiu de certificar que es la millor composició possible mitjançant la utilització del dopant de base seleccionat.

8.2.7 Detall dels resultats de la mostra numero 29

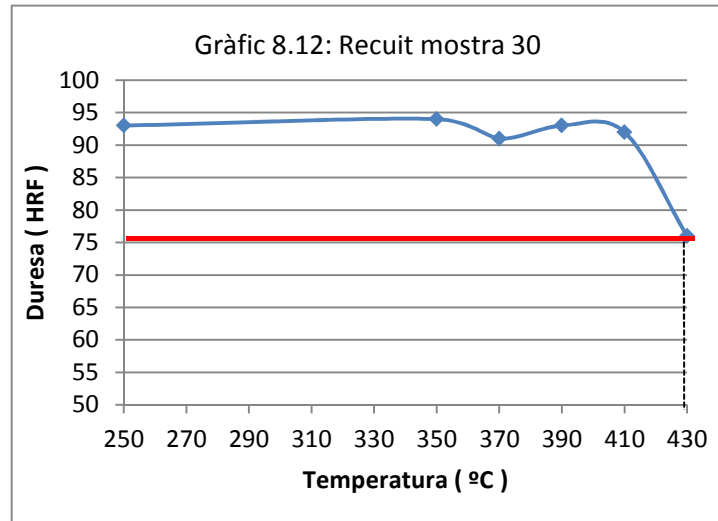
Mostra Nº	29
T recuit (°C)	465



Comentaris: La mostra 29 correspon a una lleugera variació en la composició de la mostra 27, sense obtenir un millor resultat.

8.2.8 Detall dels resultats de la mostra numero 30

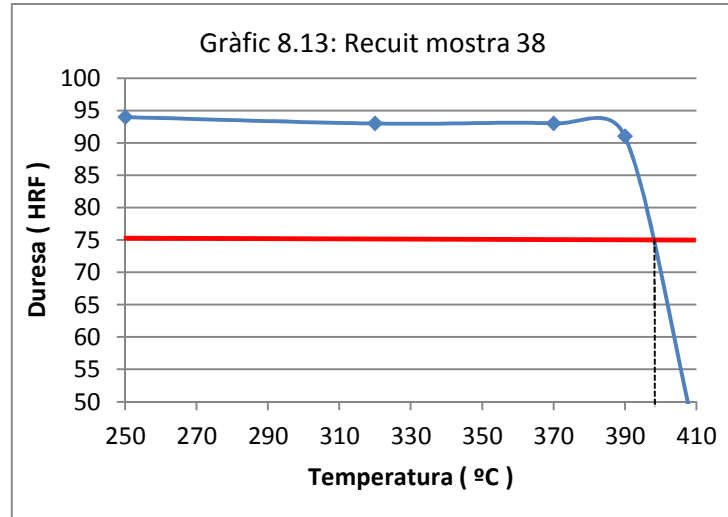
Mostra N°	30
T recuit (°C)	430



Comentaris: La mostra numero 30, en línia amb la mostra 29, tot i ésser similar a la mostra numero 27, no ofereix unes prestacions superiors.

8.2.9 Detall dels resultats de la mostra numero 38

Mostra N°	38
T recuit (°C)	395



Comentaris: La mostra numero 38 correspon a una sèrie final d'experiments realitzats utilitzant com a element dopant majoritari un element diferent als ja utilitzats en famílies anteriors. Els resultats tot i implicar una significativa millora en prestacions no s'aproximen als millors resultats obtinguts utilitzant altres elements.

9. Discussió de resultats.

9.1 Correcció de l'error de mesura

Primer de tot, abans de començar amb la discussió de resultats, es necessari tenir en compte els següents comentaris:

- La temperatura de recuit de la mostra de CuFRHC (mostra 1) sense aliar és de 385°C. Quan inicialment es va determinar sobre l'alambró de 8mm de diàmetre provinent de la colada contínua i era de 300°C, per tant hi ha un augment de 85°C. Alhora de comparar resultats, es necessari doncs restar 85°C a la temperatura de recuit de les mostres.
- Comparant les conductivitats de la mostra de CuFRHC abans i després de la colada el el forn d'inducció, observem que les mostres un cop colades, tenen una conductivitat 4 %IACS menor respecte els alambrons de colada contínua. Per tant alhora de comparar s'ha d'augmentar 4%IACS a la conductivitat de les mostres.

Aquests dos fets s'expliquen degut a que la mostra de CuFRHC té 200ppm d'oxigen contingut i en el cas de les fusions en el forn d'inducció, el contingut d'oxigen en coure es de 5ppm, a causa del grafi del gresol que desoxida el coure fos.

L'error aplicat en cada mesura es de:

- En el cas de la conductivitat, és de +-1 %iACS que equival a l'error de l'aparell
- En el cas de la temperatura de recuit, l'error de mesura estimat que es fa es de +-15°C

Per tant un cop realitzada la correcció de resultats, la taula de propietats final és la següent:

Nº fusió	Cond. (%iACS)	T recuit (K)	C*T (%IACS*K)	Nº fusió	Cond. (%iACS)	T recuit (K)	C*T (%IACS*K)
1	100,5	573	57,58	22	95,5	613	58,54
2	99	633	62,67	23	97	553	53,64
3	99,5	573	57,01	24	88	568	49,98
4	97,5	558	54,41	25	95	548	52,06
5	103	568	58,50	26	94	573	53,86
6	99	548	54,25	27	99	678	67,12
7	99	563	55,74	28	82	603	49,45
8	99	573	56,73	29	96	653	62,69
9	96,5	553	53,36	30	96	618	59,33
10	100	573	57,30	31	96	588	56,45
11	99	553	54,75	32	85	593	50,41
12	99,5	573	57,01	33	83	583	48,39
13	102	553	56,41	34	90	558	50,22
14	96,5	583	56,26	35	96	583	55,97
15	96	583	55,97	36	79	583	46,06
16	96	628	60,29	37	93	583	54,22
17	94,5	583	55,09	38	100	583	58,30
18	94	583	54,80	39	100	568	56,80
19	91	563	51,23	40	89	613	54,56
20	95,5	653	62,36	41	100	568	56,80
21	88,5	648	57,35	42	88	613	53,94

Taula 9.1: Resultats obtinguts amb correcció del error.

9.2 Calibració econòmica dels aliatges obtinguts

Un cop corregit l'error de mesura de les diferents mostres, cal remarcar el fet de que el cost econòmic de les matèries primeres de cada una d'elles té gran importància a la hora d'obtenir un producte viable comercialment.

Degut a que exposar el cost dels diferents aliatges implicaria proporcionar informació sensible a nivell comercial per part de la empresa LFL, no s'ha pogut mostrar el preu associat a cada un dels aliatges. Per poder mostrar la forma en que s'han avaluat comercialment els aliatges s'utilitzarà un coeficient econòmic (CE).

La metodologia utilitzada per definir aquest coeficient ha estat obtenir, en primer lloc el cost mig dels vuit aliatges amb millors propietats tècniques i assignar-li un valor de 100. A continuació en funció de la desviació en percentatge del preu de cada un dels aliatges s'ha calculat el coeficient econòmic.

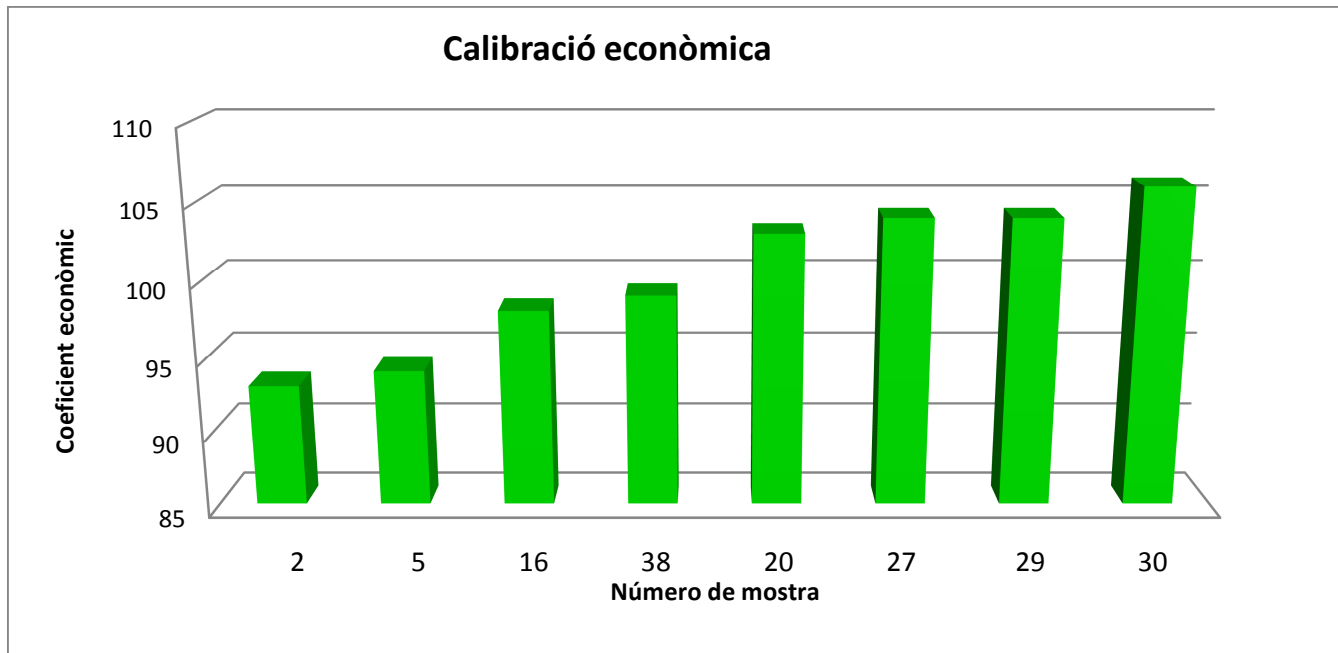
Així doncs, una aliatge amb un preu 5% superior a la mitjana rebria un coeficient econòmic de 105 i una aliatge amb un preu un 3% inferior a la mitjana obtindria un coeficient de 97.

La següent taula mostra els coeficients econòmics de cada un dels aliatges estudiats gracies a les seves altes prestacions.

Nº Mostra	CE
2	93
5	94
16	98
20	103
27	104
29	104
30	106
38	99

Taula 9.2: CE de cada aliatge.

Ordenant les mostres de menor a major coeficient econòmic s'obté una imatge visual de la competitivitat de les diferents alternatives.



Gràfic 9.1: Calibració econòmica dels aliatges obtinguts.

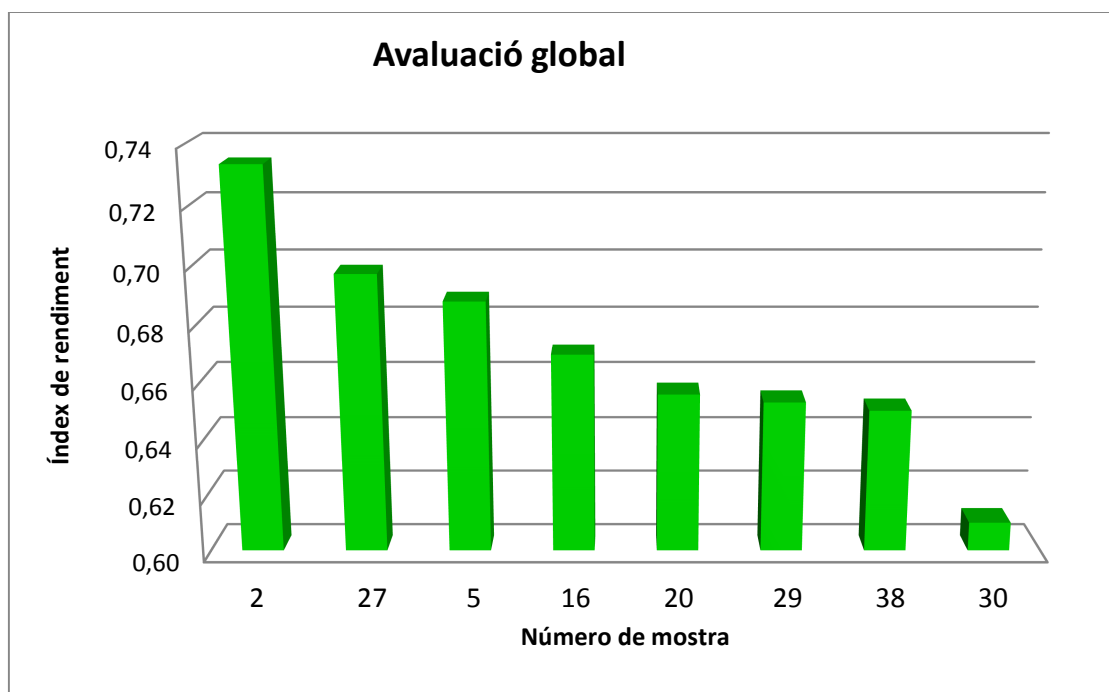
Finalment, per conèixer quina de les opcions estudiades és la més competitiva englobant propietats tècniques i cost, s'ha optat per dividir el coeficient tècnic entre el cost, obtenint com a resultat un índex de rendiment, una referencia percentual eficient que ens indica quins aliatges ofereixen una millor relació qualitat preu i per tant són les millors alternatives a nivell comercial.

Al situar el coeficient tècnic com a numerador, les prestacions tècniques ponderen de forma positiva mentre que al situar el cost en el divisor, obtenim que els productes amb un preu inferior a la mitjana es veuen beneficiats davant els productes amb un preu superior a la mitjana. Cal remarcar que si bé a primera vista una desviació del 2 o 3% podria no semblar excessivament important, la gran quantitat de producte que es comercialitzaria junt amb l'escàs marge comercial amb el que es treballa en el sector ferroviari, un encariment en la producció del 1 o 2% pot significar que un producte passi de generar beneficis a generar pèrdues.

La següent taula mostra l'índex de rendiment dels aliatges seleccionats en ordre decreixent:

Nº Mostra	IR
2	0.73
27	0.70
5	0.69
16	0.67
20	0.66
29	0.65
30	0.65
38	0.61

Taula 9.3: Índex de rendiment dels aliatges.



Gràfic 9.2: Avaluació de l'índex de rendiment

El gràfic anterior mostra de forma visual el resultat obtingut referent a la avaluació global de propietats tècniques i competitivitat econòmica dels diferents aliatges dissenyats, mitjançant l'índex de rendiment.

Les dues mostres estudiades amb millor índex de rendiment són la numero 2 i la numero 27, tenint en compte les dades amb les que s'ha treballat. La número 2

presenta en termes generals una gran competitivitat a nivell econòmic juntament amb unes prestacions tècniques òptimes. El cas del aliatge numero 27, són les seves magnifiques prestacions tècniques les que li otorguen un elevat valor dintre les diferents alternatives estudiades.

Per motius de confidencialitat d'informació, no es detallen les concentracions de cada fusió, com s'ha comentat anteriorment, ahora que no es publiquen altres conclusions que s'extreuen del seguit de fusions realitzades. Ja que ahora, es poden extreure comportaments de diferents elements un cop aliats amb el coure.

El fet de comptar amb dues alternatives obre la possibilitat a nivell mercantil d'oferir dos productes. Un amb millors prestacions tècniques a un preu superior (mostra 27) i un altre amb un preu competitiu amb propietats suficients per complir amb les especificacions tècniques exigides en el mercat de fil de catenària ferroviari (mostra 2).

10. Impacte mediambiental

El consell d'Administració de LFL, a través de la direcció general, adopta com a línies bàsiques de l'estratègia de l'empresa:

- Millora contínua en la qualitat dels productes i servei als clients.
- Prevenció de riscos laborals.
- Protecció del medi ambient.

Per garantir el compliment d'aquestes bases s'han implantat els següents sistemes de gestió:

- Sistema de Gestió de Qualitat, basat en la norma internacional ISO9001:2000.
- Sistema de Gestió Medi ambiental i Prevenció de Riscos Laborals, basat en la norma UNE EN ISO 14001 i OHSAS 18001.

Seguint aquesta política, el present projecte s'ha adaptat a aquestes línies en quan a tractament de residus. A continuació es detallen els residus generats en el present projecte, així com el seu procés de tractament:

- Mostres dels aliatges: les mostres d'aliatges, així com les virutes generades durant el seu mecanitzat, es reciclen reintrodint aquest material dins el procés de producció de l'empresa, on es recicla aquest Cu.

11. Viabilitat Econòmica.

De cara a establir la viabilitat econòmica del projecte s'han estimat els ingressos generats pels nous productes a comercialitzar a partir del volum anual d'instal·lació de fil de catenària a nivell europeu. Les hipòtesis sobre les que s'ha treballat són les següents.

- El mercat anual del fil de catenària a nivell europeu, tenint en compte tant l'establiment de noves vies ferroviàries com el manteniment que requereixen les ja establertes oscil·la al voltant de les 60.000 tones anuals. Aquesta xifra englobaria els membres de la Unió Europea que seran l'objectiu primari a nivell de màrqueting (Alemanya, França, Anglaterra, Itàlia, Espanya). Per raons tant pràctiques com econòmiques s'ha considerat més eficient concentrar l'esforç comercial en aquests països.
- El cost d'afinar el coure i produir el fil de coure ranurat per part de la empresa en el rang de preus actual està valorat en un 4%. Es a dir, si el preu del coure als mercats financers (valor de referència per a la adquisició de reciclats de coure i ànodes) és de 6.500 euros/tona, el cost per a la empresa a l'hora de produir el fil de coure ranurat seria de 260 euros la tona.
- El sobrecost degut a l'addició de matèries primeres dopants en el cas de la mostra 2, és d'un 0,8% respecte al preu del coure. En el cas de la mostra numero 27, el sobrecost respecte al preu del coure seria d'un 6,66%.

Així doncs les expectatives de cara a la posició de mercat al que pot optar l'empresa de forma objectiva, tenint en compte la dificultat de penetrar en un mercat molt estàtic en quan a la incorporació de nous materials, és d'un 10% en un marge de 10 anys tant en línies de baixa densitat ferroviària com en les línies d'alta densitat/alta velocitat.

El producte que s'oferiria per a les línies de baixa densitat ferroviària utilitzaria l'aliatge obtingut en la mostra numero 2, mentre que per a les línies d'alta densitat ferroviària així com les línies d'alta densitat s'utilitzaria l'aliatge de la mostra numero 27.

El preu de venda estipulat de FDCR per a les línies de baixa densitat serà d'un 10% per sobre del preu del coure, mentre que per a les línies d'alta densitat, que requereixen d'unes millors prestacions, el preu de venda estipulat serà d'un 14% per sobre del preu del coure. D'aquesta manera s'aconsegueix, per una banda oferir un preu competitiu per sota del preu de mercat per a la major part del mercat potencial, el de substitució de línies ferroviàries de baixa densitat, mentre que per a línies amb molta densitat on cal un producte de qualitat es pretén que el client accepti un lleuger sobre cost a canvi d'una reducció en el manteniment de les línies.

Els primers passos necessaris per a la comercialització han estat les proves sobre el terreny. Per al producte obtingut a partir de la mostra nº2, aquestes proves s'han realitzat a la línia fèrria que uneix Barcelona-Sants amb Sitges. Aquesta és una de les

línies amb més transit ferroviari d'Espanya i s'ha escollit en cooperació amb RENFE. L'aliatge obtingut a partir de la mostra nº2 degut a la seva duresa relativament baixa en comparació amb altres productes del mercat, feia témer una degradació excessivament ràpida. Tot i així les proves realitzades van donar uns resultats adequats a les necessitats de RENFE i han servit com a confirmació de l'alta qualitat del producte obtingut.

Els objectius previstos i esperables segons el pla de màrqueting realitzat per l'empresa són assolir en el plaç de 5 anys un 10% del mercat de fil de catenària a nivell europeu i mantenir aquesta demanda anual durant els següents deu anys. La penetració en aquest mercat és complexa degut a que per norma general, els tècnics que gestionen aquest tipus d'instal·lacions són molt conservadors a l'hora de realitzar canvis en la configuració de les línies fèrries. És una postura coherent degut als costos i reclamacions que generen els problemes imprevistos en aquest tipus d'instal·lacions i de la mateixa manera que al principi pot dificultar penetrar en el mercat, garanteix en certa manera, que un cop obtingut el reconeixement respecte a la qualitat i fiabilitat del producte aquest tindrà garanties en quant a una demanda regular en un marge de temps ampli.

L'avaluació dels costos de producció i la d'ingressos generats per part dels dos productes obtinguts s'ha realitzat en funció de la relació dels dos aliatges en front del preu oficial del coure metall en els mercats financers (London Metal Exchange LME)

Cost de producció fil de catenària mostra nº2: LME+4,8%.

Cost de producció fil de catenària mostra nº27: LME+10,66%.

Al mateix temps el preu de venda dels productes obtinguts arran dels dos aliatges estudiats també estan referits al preu del metall coure en el LME.

Preu de venda fil de catenària mostra nº2: LME+10%.

Preu de venda fil de catenària mostra nº27: LME+14%.

El marge comercial aplicat al producte obtingut a partir de la mostra número 27 és lleugerament inferior al que s'obté amb la mostra número 2 amb l'objectiu de fer-lo més competitiu.

Per poder produir FDCR, l'empresa ha adquirit maquinària i realitzat petites adaptacions logístiques que li han suposat un cost associat de 1.761.200 euros.

És important destacar que aquest projecte inclou exclusivament la part d'investigació necessària per obtenir els aliatges amb propietats mecàniques suficients dins la normativa i amb un cost que en permeti la seva comercialització. No obstant per avaluar la viabilitat econòmica dels productes obtinguts es necessari englobar-los dins els conjunt d'inversions que han estat necessàries per poder produir el fil de catenària. Per aquesta raó s'ha consultat amb la empresa el capital final d'inversió necessari per adquirir el material i fer les pertinents adaptacions així com els costos d'investigació

derivats d'aquest projecte. Com s'ha comentat anteriorment la xifra final d'inversió ha estat de 1.761.200 euros segons documents presentats per la empresa.

11.1 Estimació del preu del coure

En contra de la idea generalitzada sobre el valor de les matèries primeres, les quals són considerades un valor segur i a l'alça per a la major part de la població, el seu preu en els mercats financers pot oscil·lar de forma sorprenent en molt poc temps.

En el marge de temps que va de febrer del 2009 a desembre del 2010 el preu del coure es va triplicar, provocant moltes fallides en empreses que careixien de marge financer al no ésser capaces de reposar el coure necessari per continuar treballant. Es a dir, l'augment substancial del preu va obligar a immobilitzar una major part de capital circulant per poder treballar i només aquelles empreses amb una situació financera molt còmode van comptar amb el suport dels bancs.

En el següent gràfic es mostra l'evolució de preu del coure durant els últims cinc anys en el Mercat de Metalls de Londres (LME) en USD/lb, les unitats que s'utilitzen en els mercats controlats per anglosaxons.



Gràfic 11.1: Evolució del preu del coure (Feb.2009-Dec.2013)

De cara a poder estimar un preu futur del coure a llarg plaç, caldria realitzar un anàlisi molt profund de la economia mundial, els principals productors i consumidors però no

obstant, a partir del gràfic (11.2) es pot obtenir informació suficient com per realitzar una estimació relativament acurada.



Gràfic 11.2: Anàlisi tècnic sobre el gràfic del preu coure 2009-2013.

Els valors màxims que van assolir del preu del coure entre Desembre 2010 i Juny 2011 entorn als 4500 USD/lb eren una referència clara de resistència, es a dir un rang de preus que era molt difícil de superar degut a que la quantitat de ventes en arribar a aquest preu va ser molt elevat. Per altra banda, en l'entorn dels 3000 USD/lb tenim un suport. En moments on el preu anava a la baixa, les compres augmentaven amb força un cop el preu es va aproximar al valor de 3000 USD/lb, era factible pensar que seria complicat que el preu baixés d'aquest valor. Per tant i tenint en compte la recta que indica la tendència baixista del preu entre els màxims de 2011 i el moment actual, es previsible que el preu superi aquesta recta baixista (Senyalada en el gràfic de color blau) i es mantingui relativament estable entre els 4500 USD/lb i els 3500 USD/lb.

Una lliura són 0,4535 kg i un dolar són 1,38 euros (a data de 21 maig del 2014). Si acceptem com a referencia els 4000 USD/lb, preu intermig entre 3500 i 4500 i ho adaptem a unitats europees, el preu estimat del coure per realitzar els càlculs de viabilitat economia seria de 6500 euros/tona aproximadament.

11.2 Previsió de ventes

Com ja s'ha comentat que en funció del pla de màrqueting de la empresa s'espera copar un 10% del mercat de fil de coure per catenària a nivell europeu. Aquest 10% es preveu assolir-lo en un marge de 5 anys i posteriorment mantenir-lo uns altres 10. El mercat potencial previst és de 20.230 tones anuals per al fil destinat a línies fèrries convencionals i de 7.300 tones per al fil destinat a línies de alta velocitat.

S'ha previst un augment anual lineal de 405 tones durant els primers 5 anys per al fil de catenària de línia convencional i de 146 per al fil de línies de alta velocitat assolint al final del cicle de 5 anys, la xifra de ventes esperada del 10% del mercat potencial.

Any	1er	2on	3er	4art	5è
Vendes mostra nº2 tones	405	811	1.216	1.561	2.027
Vendes mostra nº27 tones	146	292	438	584	730

Taula 11.1: Previsió de ventes durant els cinc primers anys.

11.3 Costos de producció.

Els costos de producció associats a les ventes previstes, per a cada un dels aliatges són d'un 4,8% en relació al preu del coure fixat per LME per a la mostra n°2 i d'un 10,66% per a la mostra n°27 degut al sobrecost que suposa l'ús de matèries primeres de cost més elevat.

Els resultats obtinguts sobre els costos productius durant els cinc primers anys es mostren en la taula següent.

Any	1er	2on	3er	4art	5è
Costos Producció mostra n°2 (€)	3.398.314	6.796.629	10.194.944	13.090.218	16.991.573
Costos Producció mostra n°27 (€)	1.292.508	2.585.017	3.877.526	5.170.035	6.462.544
Costos de Producció totals (€)	3811294	7622588	11433882	14836456	19056470

Taula 11.2: Costos de producció durant els primers 5 anys.

11.4 Ingressos

Com ja s'ha comentat, els ingressos s'obtingrien de multiplicar el nombre de tones comercialitzades de cada un dels productes obtinguts arran de les mostres estudiades aplicant un marge comercial del 10% sobre el preu del coure (LME) en el cas del producte obtingut a partir de la mostra nº2 i d'un 14% en el producte obtingut a partir de la mostra numero 27.

Es preveu augmentar de forma lineal la quantitat de tones de producte comercialitzat fins arribar al 10% del mercat de fil catenària al 5è any. A partir d'aquest punt, es considera que la xifra de ventes es mantindrà estable els següents deu anys, moment en el que finalitzarà el cicle d'amortització de la instal·lació de 15 anys.

Any	1er	2on	3er	4art	5è
Ingressos mostra nº2 (€)	2.898.133	5.796.267	8.694.400	11.163.533	14.490.667
Ingressos mostra nº27	1.081.860	2.163.720	3.245.580	4.327.440	5.4093.00
Ingressos totals (€)	3.979.993	7.959.987	11.939.980	15.490.973	19.899.967

Taula 11.3: Ingressos estimats durant els cinc primers anys.

11.5 Marcadors Econòmics

Els marcadors econòmics que s'han estudiat són el Benefici Brut, el Benefici després d'amortitzacions i taxes, el Cash Flow, el Pay-Back, el Valor Actual Net (VAN) i la Tasa Interna de Retorn (TIR).

L'amortització de la inversió està prevista a 15 anys i el valor residual de la maquinària un cop amortitzada es considera 0 degut a la falta de possibles compradors per a una maquinària d'aquest tipus.

Les taxes aplicades en concepte d'impost de societats són del 30% segons l'article 6 de la llei 16/2012 publicada al BOE el 27 de desembre del 2012.

Els costos financers deriven exclusivament de la pèrdua d'interessos que es podien haver obtingut amb el capital propi utilitzat . La rendibilitat actual per dipòsits de renda fixa que ofereix el mercat està entorn al 4%.

La inversió realitzada en concepte de adquisició de maquinària, adequació logística i el present projecte d'I+D ha ascendit a 1.761.200 euros.

$$\text{Benefici Brut} = (\text{Ingresos})_n - (\text{Costos d'exploració})_n \quad \textbf{Equació 11.1}$$

Sent (n) l'any corresponent al càlcul, ja que tant el valor dels ingressos com el dels costos d'exploració varia durant els primers 5 anys.

$$\text{Benefici després d'amortitzacions i taxes} = (\text{Benefici Brut})_n - (\text{Amortitzacions})_n - (\text{Taxes})_n.$$

Equació 11.2

Les taxes s'apliquen a la diferència entre el Benefici Brut i les amortitzacions.

$$\text{Cash Flow} = (\text{Benefici després d'Amortitzacions i Taxes})_n - (\text{Costos Financers})_n$$

Equació 11.3

En la següent taula es mostren els resultats obtinguts per als diferents marcadors en cadascun dels primers 5 anys de explotació del negoci.

Any	1er	2on	3er	4art	5è
Benefici Brut (€)	168.699	337.399	506.097	654.517	843.496
Amortitzacions (€)	117.413	117.413	117.413	117.413	117.413
Taxes (€)	15.385	65.955	116.605	161.131	217.824
Benefici d'esperes d'Amort i Taxes. (€)	35.901	154.031	272.079	375.973	508.259
Costos Financers (€)	70.448	70.448	70.448	70.448	70.448
Cash Flow (€)	-34.547	83.583	201.631	305.525	437.811

Taula 11.4: Marcadors econòmics durant els cinc primers anys d'explotació.

Els resultats obtinguts mostren un Benefici Brut que augmenta paulatinament durant els 5 anys des de 168.699 € el primer any d'exploració fins als 843.496 € al 5è any. Aquesta xifra en principi es mantindria els següents 10 anys un cop afiançada la quota del 10% del mercat europeu de fil de catenària.

Les amortitzacions es realitzaran de forma uniforme al llarg de tot el període d'exploració estimat en 15 anys per un valor anual de 117.413 €.

Es preveu que les taxes generades pel negoci creixeran en paral·lel al benefici, des de un valor de 15.385 euros el primer any fins a 217.824 en el 5è any.

Així doncs els Benefici Net, després d'amortitzacions i impostos serà de 35.901 euros el primer any augmentant de forma lineal fins als 508.259 euros el 5è any.

Un cop descomptats els interessos derivats del cost financer d'utilitzar capital propi per fer la inversió per un valor de 70.448 euros anuals, s'obtindrien els Cash Flows corresponents a cada any d'exploració. Si bé el primer any el resultat que ofereix el Cash Flow és negatiu per un valor de 34.547 euros, ja a partir del segon any apareixen Cash Flows positius fins a assolir la xifra de 437.811 euros el darrer dels 5 anys.

Un cop obtingudes aquestes dades referents als marcadors econòmics simples més importants, cal enfocar l'avaluació econòmica cap a indicadors que tinguin en compte la depreciació de la moneda degut a la inflació així com els augments de preu degut al augment dels costos d'exploració, es a dir, els indicadors econòmics que actualitzen els resultats futurs al valor de la moneda actual. Aquests indicadors són el Valor Actual Net (VAN) i la Tassa Interna de Retorn (TIR). A partir de la taula 10.5 es pot comprovar el moment en el que els beneficis generats per la inversió superen el total de capital invertit en el projecte, aquest punt es coneix com Pay Back, el qual es situa en el cinquè any després de la inversió.

Les equacions que defineixen els marcadors VAN, TIR i Pay Back són les següents:

$$VAN = -I + A_0 \sum_{j=1}^n \frac{(1+z)^j}{(1+r)^j} \quad \text{Equació 11.4}$$

$$A_0 \sum_{j=1}^n \frac{(1+z)^j}{(1+TIR)^j} = SI \quad \text{Equació 11.5}$$

$$I = \sum_{j=1}^{PB} \frac{A_j}{(1+r)^j} \quad \text{Equació 11.6}$$

On (j) indica l'any estudiat, (z) el coeficient aplicat en concepte d'augment dels costos d'exploració que es traslladen al client i finalment (r) és la taxa de descompte combinada de inflació més costos financers.

En referència a la inflació i en base a l'informe publicat pel Banc d'Espanya a març de 2013, s'ha estimat un valor mig del 2%.

El valor de la taxa de descompte (r) que és la suma de la inflació més els interessos bancaris, s'ha estimat en un 6%. Un 2% degut a la inflació i un 4% degut als interessos bancaris per a dipòsits.

Els resultats que ofereix la Taula 11.5 són els valors dels 3 indicadors econòmics Pay-Back, VAN i TIR

- PayBack seria entorn a **4,3 anys**.
- VAN seria de **7,5 M€**
- TIR seria d'un **32%**.

Any	Sobre Inversió	Estalvi (€) nominals	Estalvi actualitzat(€) constant	VAN (€) constant	TIR (40,68%)
0	1.761.200				
1		172.073	172.073	-1.589.127	-1.630.842
2		351.030	496.620	-1.264.580	-1.429.379
3		537.074	974.077	-787.123	-1.195.865
4		708.470	1.579.680	-181.520	-962.505
5		931.288	2.345.131	583.931	-730.117
6		949.913	3.095.861	1.334.661	-550.544
7		968.912	3.832.155	2.070.955	-411.783
8		988.290	4.554.288	2.793.088	-304.559
9		1.008.056	5.262.535	3.501.335	-221.704
10		1.028.217	5.957.162	4.195.962	-157.680
11		1.048.781	6.638.430	4.877.230	-108.206
12		1.069.757	7.306.597	5.545.397	-69.977
13		1.091.152	7.961.914	6.200.714	-40.436
14		1.112.975	8.604.630	6.843.430	-17.609
15		1.135.235	9.234.985	7.473.785	≈0

Taula 11.5: Obtenció dels indicadors econòmics amb actualització dels preu de la moneda.

Els resultats obtinguts indiquen que el projecte plantejat és rentable i que per tant és plenament justificada la inversió requerida. Si bé el PayBack de 4,3 anys excedeix lleugerament l'òptim, entorn a 3 anys, és degut a que la penetració en el mercat es durà de forma progressiva i aquest fet provoca per tant un lleuger retràs en el retorn de la inversió. Tot i així un TIR del 32% indica un marge més que suficient per garantir la rendibilitat de la inversió.

12. Pressupost econòmic del projecte

El pressupost d'aquest projecte inclou exclusivament els costos d'investigació derivats de la cerca d'un aliatge per ésser utilitzada com a fil de catenària amb suficients propietats mecàniques per complir amb la normativa i amb un cost econòmic que garanteixi un producte competitiu en el mercat.

Els costos que han definit el pressupost del projecte han estat en primer lloc el cost derivat de l'obtenció de matèries primeres. S'ha tingut en compte tant el cost del coure com el cost dels diferents agents dopants que s'han utilitzat.

En segon lloc s'han adjuntat els costos derivats de la fusió i de la mecanització de les mostres per al seu estudi. En alguns casos aquest mecanitzat s'ha realitzat de forma externa i només s'ha computat el preu de facturació. En d'altres casos, com per exemple la preparació de mostres, ha estat el personal de la empresa el que ha realitzat les proves o assajos i junt amb el cost propi de realitzar l'experiment s'ha adjuntat el cost en hores per home.

Finalment s'ha tingut en compte els costos d'enginyeria derivats de la redacció del projecte d'enginyeria, l'avaluació de resultats, la presentació d'informes interns i la tramitació d'ajuts i subvencions per a la realització del projecte.

12.1 Cost d'adquisició del Coure

Per realitzar les fusions, s'han necessitat un total de 95 kg de coure. A la data en que l'empresa La Farga Lacambra va subministrar el material, el preu del coure era de 6,43 euros/kg

Es van subministrar 120 kg de coure el que suposa un cost de 771,6 euros dels quals es van retornar 160,75 euros degut a que no es va utilitzar tot el coure subministrat per realitzar les fusions. Per tant el cost total del coure utilitzat ha estat de 610,85 €.

12.2 Elements dopants

Els diferents elements d'aliatge també els va subministrar l'empresa sol·licitant. Els elements d'aliatge eren restes de projectes anteriors, per tant al formar part del passiu de la empresa en forma de reserves de matèries primeres, ha estat necessari comptabilitzar-ne tant la quantitat utilitzada com el seu cost unitari en kg, els quals es mostren en la Taula 12.1.

Com ja s'ha comentant en l'apartat de selecció de materials, s'ha procurat utilitzar materials de baix cost per procurar no encarir excessivament el producte obtingut, de cara a garantir-ne la competitivitat en els mercats comercials.

No obstant, en general les quantitats utilitzades en relació al coure, material de base dels aliatges és relativament petita, en alguns casos per descartar aspectes concrets s'han realitzat composicions amb alt contingut en algun dels agents dopants principalment de cara a evitar riscos en el procés productiu més que amb l'objectiu d'obtenir una mostra amb altes propietats.

Material	Cost (\$/kg)	Quantitat emprada (kg)	Cost (€)
Cu	6,43	95	610,85
A	1,10	2	2,2
B	1,81	0,4	0,72
C	14,42	0,8	11,53
D	16,00	0,6	9,6
E	24,61	1,2	29,53
F	146,00	0,4	58,41
G	1.107,40	0,2	221,48
TOTAL			944,32

Taula 12.1: Relació de costos associats a la matèria prima emprada

Els agents dopants han afegit un cost de **333,47 €** al projecte que sumats als **610,85 €** de cost del coure completen els **944,32 €** de cost de les matèries primeres emprades en aquest projecte.

12.3 Mecanitzat de mostres

Les mostres les varen mecanitzar a l'empresa ECME, situada a la població de Vinyoles de Voltregà. El cost de mecanitzat era de 15 euros per mostra, a on cal sumar el cost de 10 euros en concepte de mà d'obra i l'impost sobre el valor afegit (IVA) del 21%. El cost unitari final ha estat de 30,25 €.

Han estat mecanitzades un total de 44 mostres durant el transcurs del projecte essent el cost final d'aquests mecanitzats de **1.331 €** (IVA inclòs)

12.4 Bombona de Nitrogen

Per dur a terme totes les fusions, es va emprar una bombona de nitrogen comprimit de 9,4 m³. El forn, necessita el nitrogen comprimit per a dues funcions:

- Activar el cilindre pneumàtic del dit sellant del dipòsit de fosa.
- Crear una atmosfera controlada.

El cost d'una ampolla és de **120 euros IVA inclòs**.

12.5 Preparació de mostres

L'empresa La Farga Lacambra, va cedir les seves instal·lacions per a la preparació de mostres. Això va permetre reduir significativament els costos derivats d'aquesta partida del projecte. Ja que no s'ha de computar com a despesa.

12.5.1 Costos de fusió de mostres.

Cost unitari de fosa per mostra: 12 €.

Cost hores home personal tècnic autoritzat: 18 €/hora.

Nombre de mostres foses: 44.

Nombre d'hores emprades: 33 hores.

Cost total de la fosa de mostres: 1.122 €

12.5.2 Costos del fresat de mostres.

Cost unitari del fresat per mostra: 5€.

Cost hores home personal de taller: 10€/hora.

Nombre de mostres fresades: 44.

Nombre d'hores emprades: 11 hores.

Cost total del fresat de mostres: 330€

12.5.3 Cost dels anàlisis de conductivitat

Cost unitari d'anàlisi de conductivitat per mostra: 7,5€

Cost hores home personal de laboratori: 12€/hora.

Nombre de mostres analitzades: 44.

Nombre d'hores emprades: 22 hores.

Cost total dels anàlisi de conductivitat elèctrica: 594 €

12.5.4 Cost dels anàlisis químics.

Cost unitari d'anàlisi químic per mostra: 8€

Cost hores home personal de laboratori: 12€/hora.

Nombre de mostres analitzades: 44.

Nombre d'hores emprades: 22 hores.

Cost total dels anàlisis químics: 616 €

12.5.5 Cost dels assajos per a la determinació de la temperatura de recuit.

Cost unitari del assaig de temperatura de recuit: 5€

Cost hores home personal de laboratori: 12€/hora.

Nombre de mostres estudiades: 44.

Nombre d'hores emprades 44 hores.

Cost total dels assajos per a la determinació de la temperatura de recuit: 704 €

12.5.6 Costos d'enginyeria

Els costos d'enginyeria estan derivats de la dedicació a temps parcial de l'autor del projecte en la gestió de les proves realitzades, l'avaluació dels resultats obtinguts, el redactat d'informes i la presentació del present projecte d'enginyeria.

El nombre aproximat d'hores que s'han dedicat a la gestió, posta en marxa i redacció del present projecte ha estat de 400 hores, incloent desplaçaments. El cost hora home per a la realització del projecte ha estat de 12 euros/hora, per tant, el cost total d'enginyeria ha estat de **4.800 euros**.

12.5.7 Altres costos del projecte.

Desplaçaments: 115 €

Dietes: 45 €

Equip ignífug per a la colada de les mostres: 65 €

Material de laboratori vari: 145 €

Amortització d'ordinadors i equip d'oficina: 450€

Material de papereria: 22 €

Total altres costos del projecte: 842 €

12.6 Resum del pressupost.

En la següent taula es recopilen els diferents costos associats al projecte i el cost total d'aquest.

Concepte	COST (€)
Cost del coure	610
Elements dopants	333
Fusió de mostres	1122
Mecanitzat de mostres	1331
Nitrogen	120
Fresat mostres	330
Anàlisi conductivitat	594
Anàlisi químic	616
Determinació temperatura recuit	704
Altres costos del projecte	842
Costos de projecte d'enginyeria	4.800
TOTAL	11.402

Taula 12.2: Recopilació del pressupost del projecte.

13. Planificació del projecte

El projecte s'ha estructurat en les següents tasques:

- Búsqueda d'información i bibliografia:

Descripció: Cerca bibliogràfica sobre aliatges de coure

Duració tasca: 16 dies.

- Planificació de les fusions

Descripció: Selecció dels elements a provar i determinació dels límits de concentració per a cada element

Duració tasca: 1 dia.

- Execució de les fusions

Descripció: Executar les fusions programades

Duració tasca: 13 dies.

- Preparació mostres

Descripció: Preparació de mostres per a la posterior caracterització

Duració tasca: 4 dies.

- Determinació de propietats I

Descripció: Determinació de conductivitat i composició química

Duració tasca: 4 dies.

- Determinació de propietats II

Descripció: Determinació de les temperatures de recuit

Duració tasca: 10 dies.

- Anàlisi de resultats

Descripció: anàlisi dels resultats obtinguts

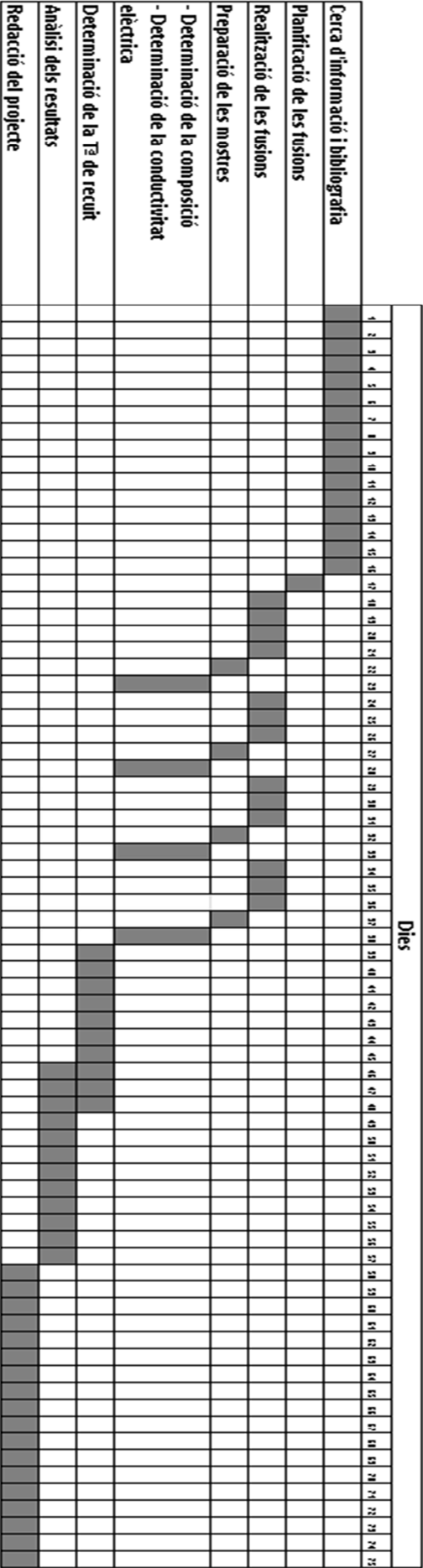
Duració tasca: 12 dies.

- Redacció projecte

Descripció: redacció del projecte, així com dels annexes dels que consta

Duració tasca: 25 dies.

Diagrama Gant:



14. Bibliografia

14.1 Recerca bibliogràfica convencional

- [1] Properties and selection non ferrous alloys and Special-Purpose Materials Volume 2
ASM HANDBOOK
- [2] Copper and Cooper Alloys
ASM SEPCIALTY HANDBOOK
- [3] S.Constantinescu, A.Popa, J.R.Groza, I.Block; Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 5 (1996) 695-698.
- [4] B.L.Mordike, T.Ebert; Journal of Material Science and engineering, Vol.302 (2001) 37-45.
- [5] Lihua Dong, Bing Yin, Li Zhang, Yansheng Yin, Yijun Zhang; Synthetic Metals, Vol. 32 (2007) 119-125.
- [6] A.Esparducer, M.Segarra, F.Espiell, M.Garcia, O.Guixa; Journal of Material Sciencie, Vol. 36 (2001) 241-245.
- [7] A.Esparducer, MA. Fernandez, M.Segarra, JM.Chimenos, F.Espiell, M.Garcia, O.Guixa; Journal of Material Sciencie, Vol. 34 (1999) 4239-4244.
- [8] P.J.Ding, W.A.Lanford, S.Hymes, S.P.Muraka; Applied Phisics Letters, Vol. 64 (1994) 2897-2899.
- [9] W.A.Lanford, P.J.Ding, Wei Wang, S.Hymes, S.P.Muraka; Materials Chemistry and Physics, Vol 41 (1995) 192-198.
- [10] Carl Zweben; JOM, Vol 44 (1992) 15-23.
- [11] Y.Sakai, H.J.Schneider-Muntau; Acta Materialia Vol.45 (1997) 1017-1023.
- [12] Y.Sakai, K.Inoue, T.Asano, H.Maeda; Magnetics IEEE Transactions, Vol. 28 (1992) 888-891.

[13] Rosa Serra, Emili Bayón; La Farga Lacambra. Solucions en coure des de 1808. La Farga Lacambra, 2008. ISBN: 978-84-96970-29-8.

[14] M.T.Jovanovic, V.Rajkovic; High electrical conductivity Cu-Based alloys. Part I. Institute of Nuclear Sciences, Vinca, Belgrade, Serbia, 2009.

[15] William F. Smith, Javad Hashemi; Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. 4a ed. México. McGraw-Hill. Primera edición en espanyol, 2006

[16] William D. Callister. Jr; Ciencia e ingeniería de los materiales. 3ª ed. Barcelona. Editorial Reverté, S.A., reimprès 2007

[17] F.R.Morral, E.Jimeno, P.Moler;. Metalúrgia general. Tomo II. Barcelona, Editorial Reverté, 1985, reimpressió Julio 2004

14.2 Recerca bibliogràfica per internet

<http://www.bde.es/f/webbde/SES/Secciones/Publicaciones/InformesBoletinesRevistas/BoletinEconomico/13/Mar/Fich/be1303-proy.pdf> C

(Consultada 27/01/2014)

<http://www.lme.com/> (Consultada 04/01/2014)

<http://www.kitcometals.com/charts/copper.html> (Consultada 08/01/2014).

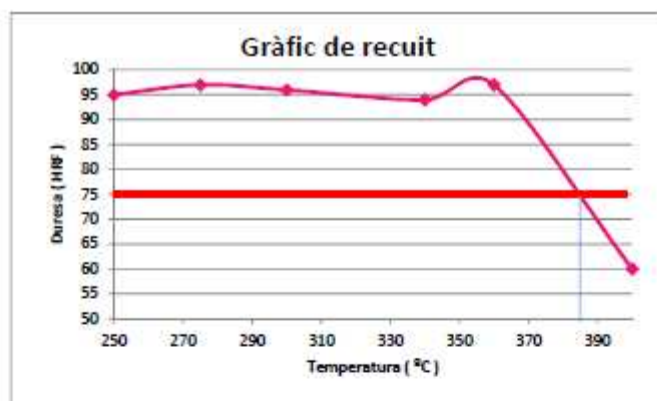
<http://www.engineershandbook.com/Tables/hardness.htm> (Consultada 08/01/2014)

ANEX I

A continuació es mostren les gràfiques de recuit de les 42 aliatges:

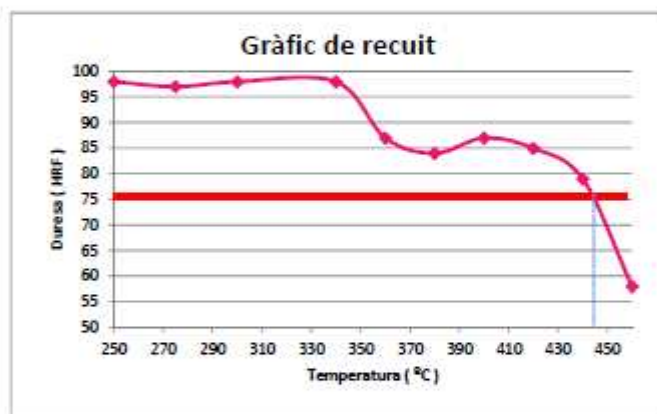
Mostra N°	1
T recuit (°C)	385

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	95
275	97
300	96
340	94
360	97
400	60



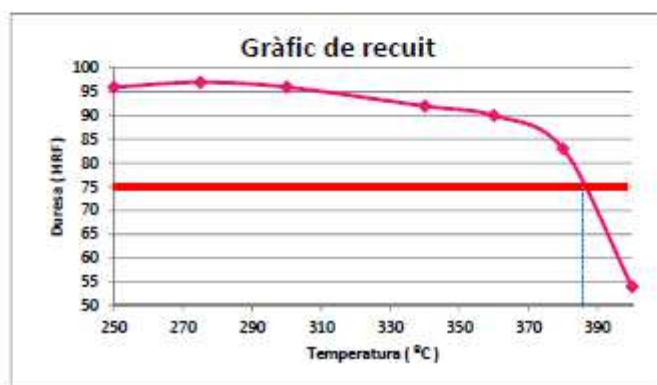
Mostra N°	2
T recuit (°C)	445

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	98
275	97
300	98
340	98
360	87
380	84
400	87
420	85
440	79
460	58



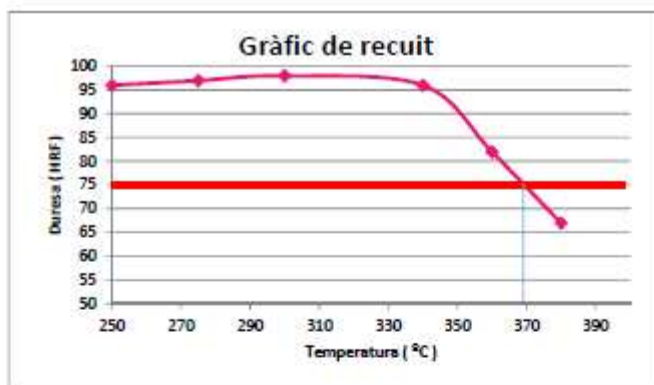
Mostra N°	3
T recuit (°C)	385

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	96
275	97
300	96
340	92
360	90
380	83
400	54



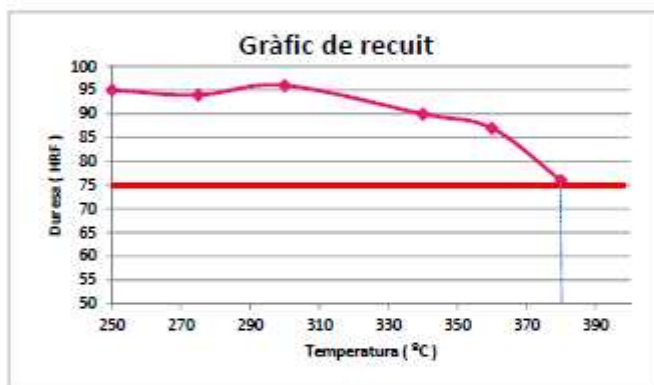
Mostra N°	4
T recuit (°C)	370

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	96
275	97
300	98
340	96
360	82
380	67



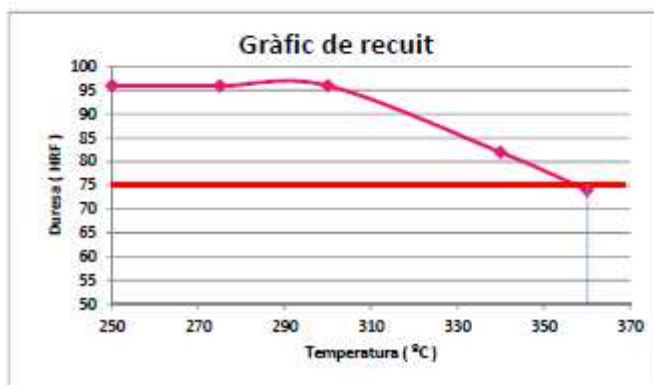
Mostra N°	5
T recuit (°C)	360

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	95
275	94
300	96
340	90
360	87
380	76



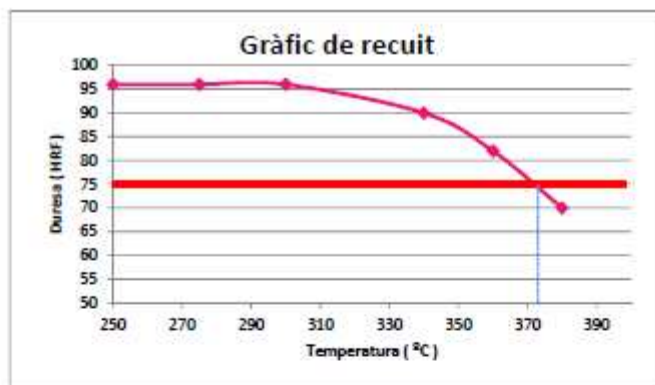
Mostra N°	6
T recuit (°C)	360

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	96
275	96
300	96
340	82
360	74



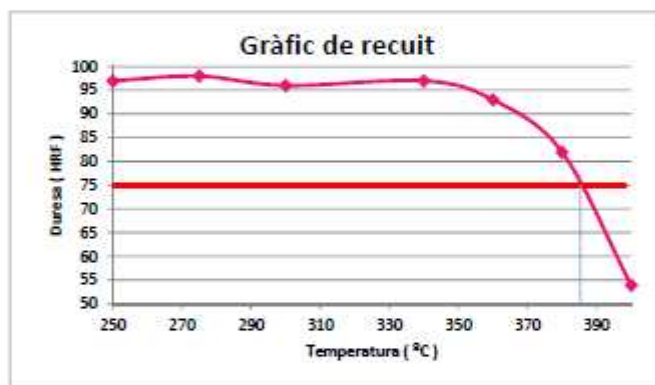
Mostra N°	7
T recuit (°C)	375

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	96
275	96
300	96
340	90
360	82
380	70



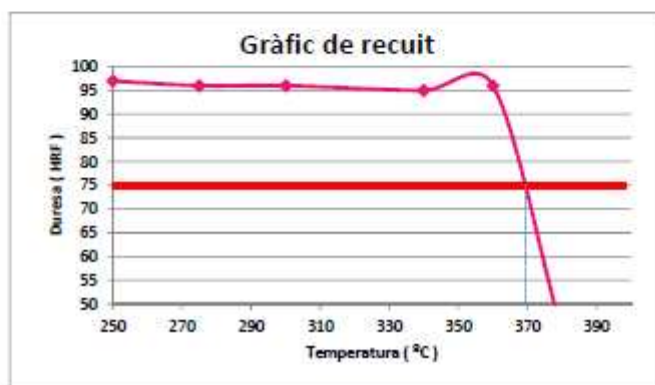
Mostra N°	8
T recuit (°C)	385

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	97
275	98
300	96
340	97
360	93
380	82
400	54



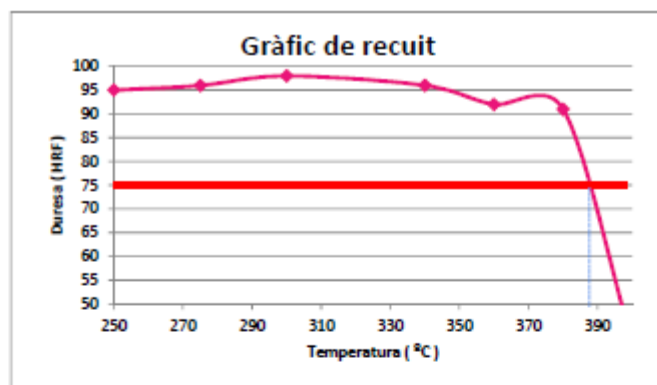
Mostra N°	9
T recuit (°C)	365

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	97
275	96
300	96
340	95
360	96
380	44



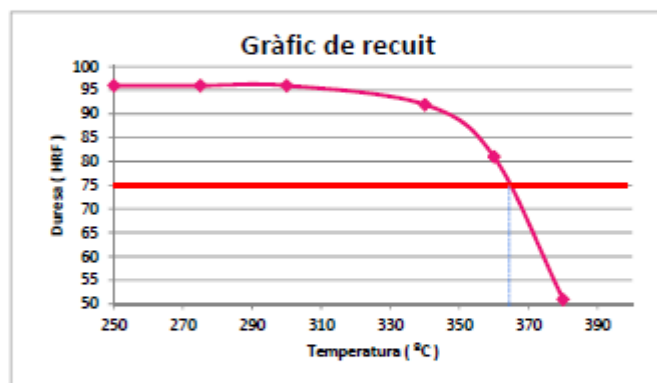
Mostra N°	10
T recuit (°C)	385

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	95
275	96
300	98
340	96
360	92
380	91
400	42



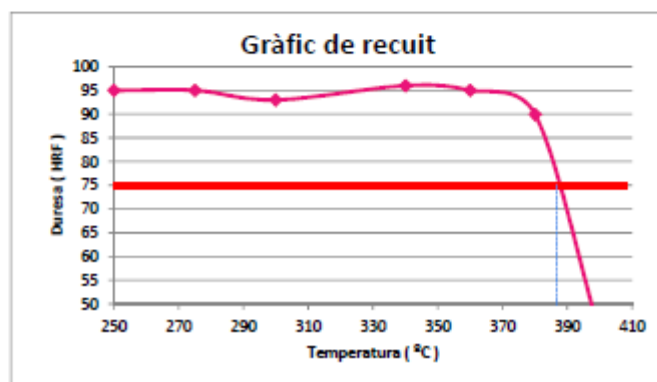
Mostra N°	11
T recuit (°C)	365

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	96
275	96
300	96
340	92
360	81
380	51



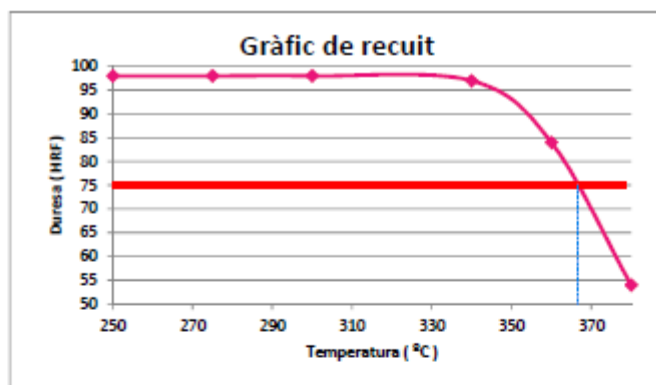
Mostra N°	12
T recuit (°C)	385

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	95
275	95
300	93
340	96
360	95
380	90
400	44



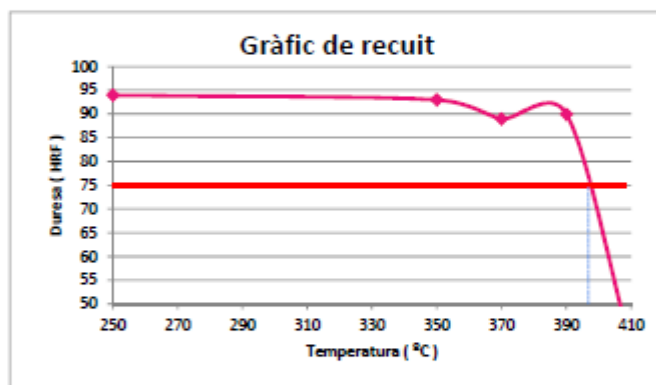
Mostra N°	13
T recuit (°C)	365

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	98
275	98
300	98
340	97
360	84
380	54



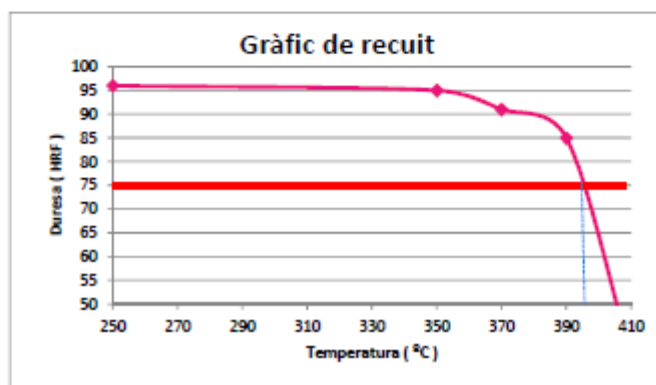
Mostra N°	14
T recuit (°C)	395

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	94
350	93
370	89
390	90
410	41



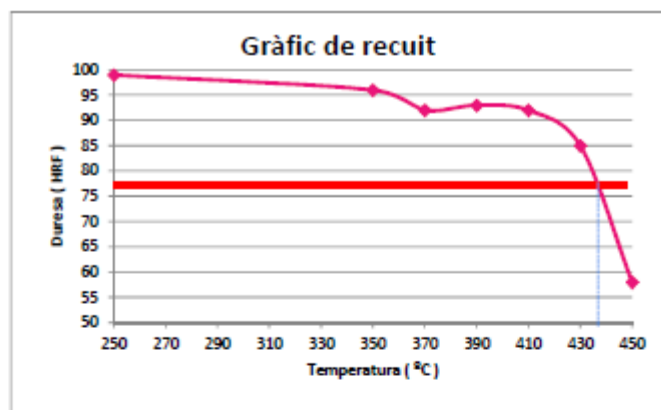
Mostra N°	15
T recuit (°C)	395

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	96
350	95
370	91
390	85
410	39



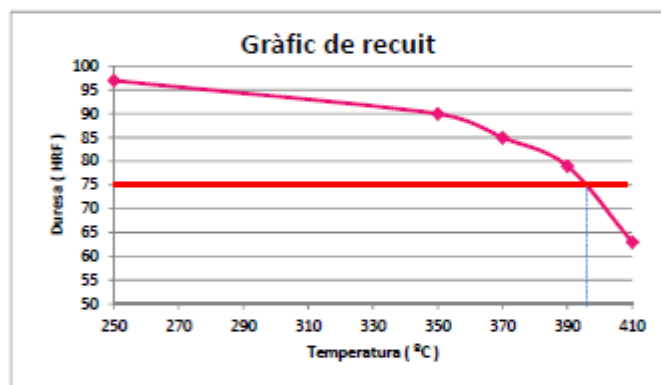
Mostra Nº	16
T recuit (°C)	440

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	99
350	96
370	92
390	93
410	92
430	85
450	58



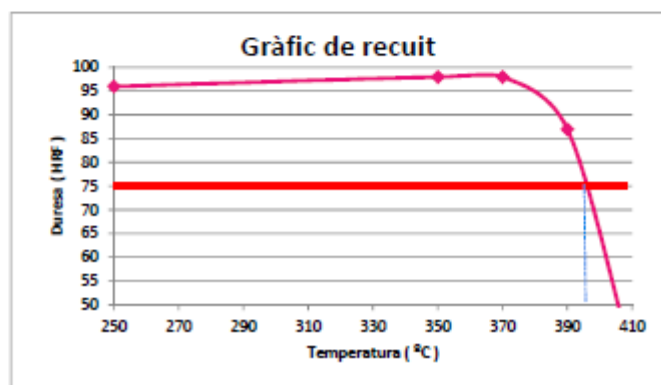
Mostra Nº	17
T recuit (°C)	395

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	97
350	90
370	85
390	79
410	63



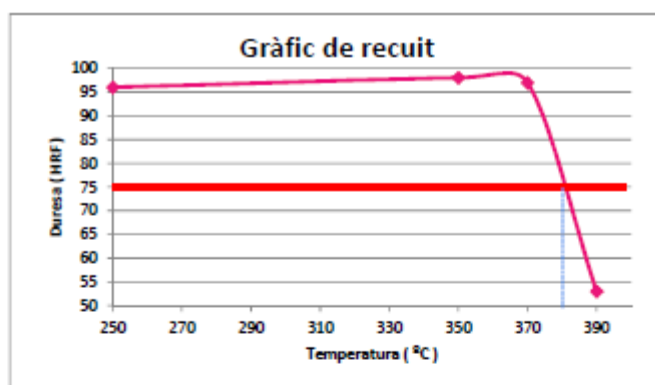
Mostra Nº	18
T recuit (°C)	395

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	96
350	98
370	98
390	87
410	39



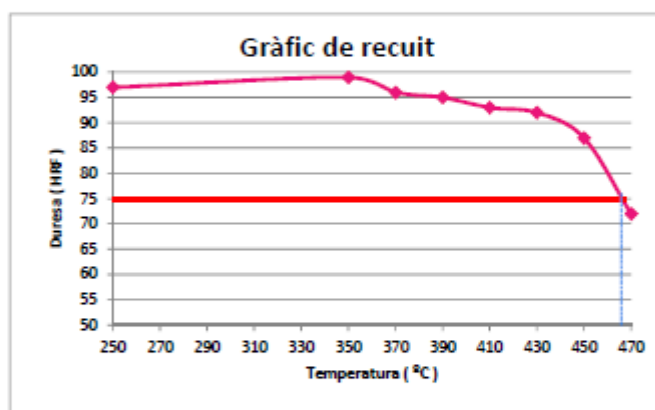
Mostra N°	19
T recuit (°C)	375

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	96
350	98
370	97
390	53



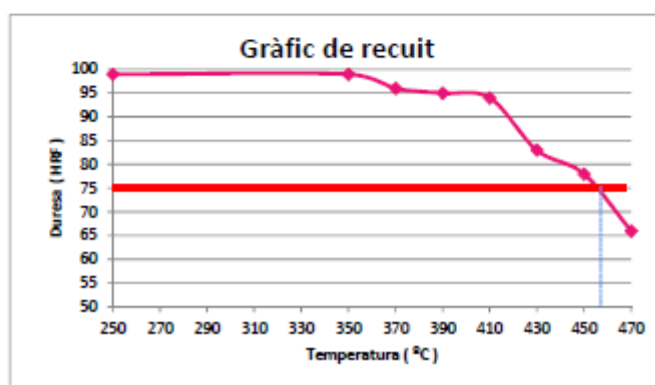
Mostra N°	20
T recuit (°C)	465

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	97
350	99
370	96
390	95
410	93
430	92
450	87
470	72



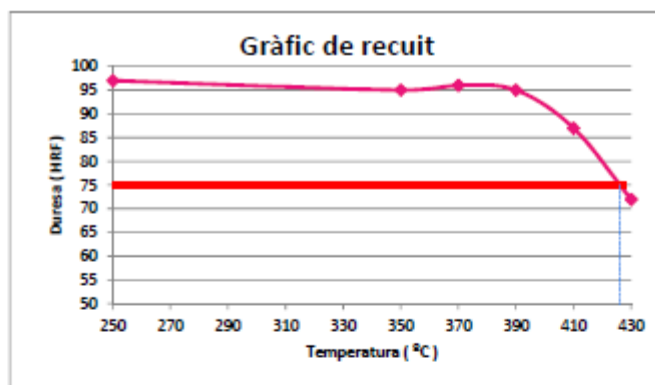
Mostra N°	21
T recuit (°C)	460

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	99
350	99
370	96
390	95
410	94
430	83
450	78
470	66



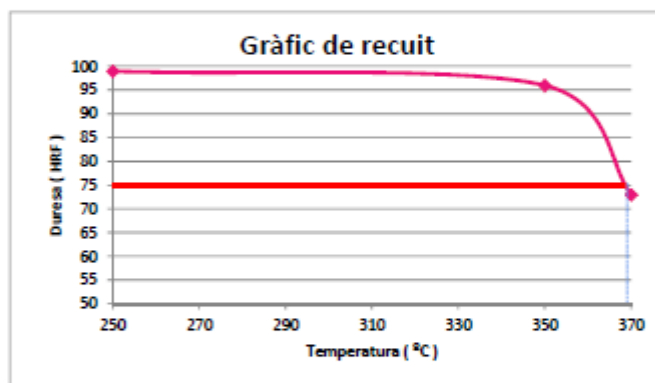
Mostra N°	22
T recuit (°C)	425

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	97
350	95
370	96
390	95
410	87
430	72



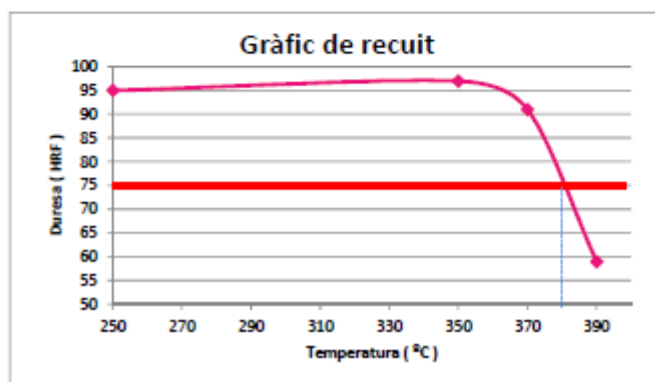
Mostra N°	23
T recuit (°C)	365

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	99
350	96
370	73



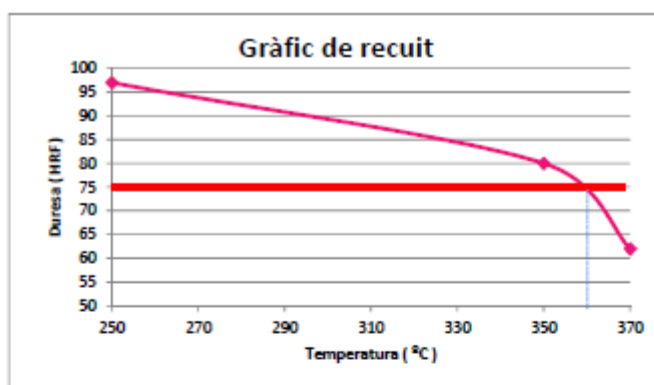
Mostra N°	24
T recuit (°C)	380

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	95
350	97
370	91
390	59



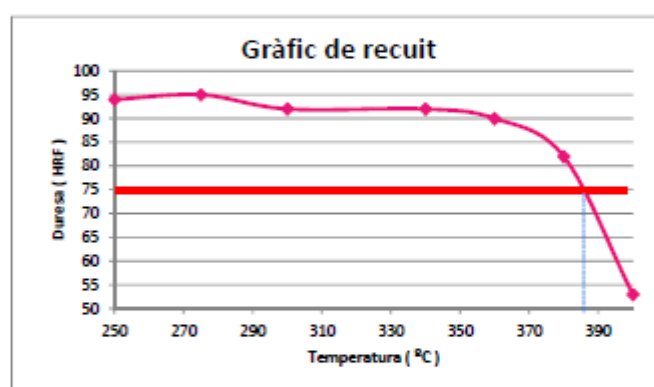
Mostra N°	25
T recuit (°C)	360

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	97
350	80
370	62



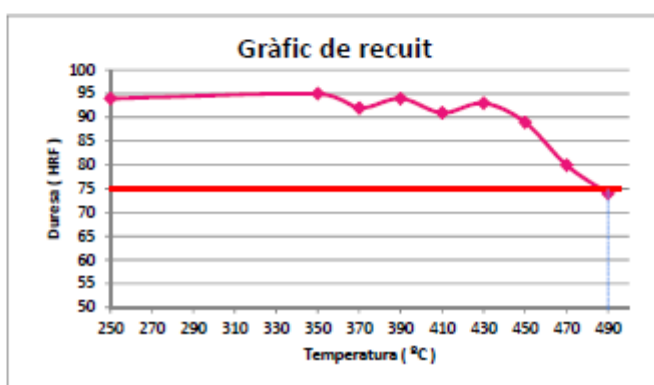
Mostra N°	26
T recuit (°C)	385

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	94
275	95
300	92
340	92
360	90
380	82
400	53



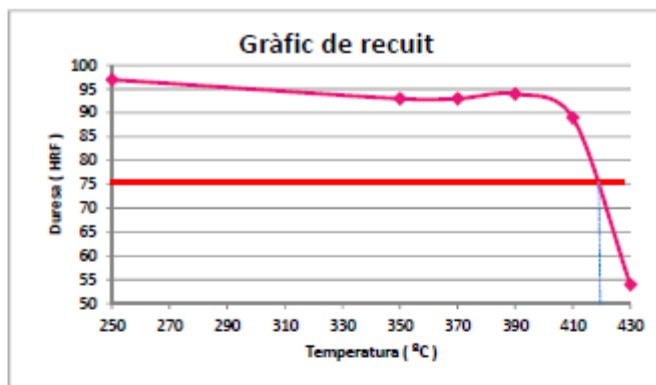
Mostra N°	27
T recuit (°C)	490

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	94
350	95
370	92
390	94
410	91
430	93
450	89
470	80
490	74



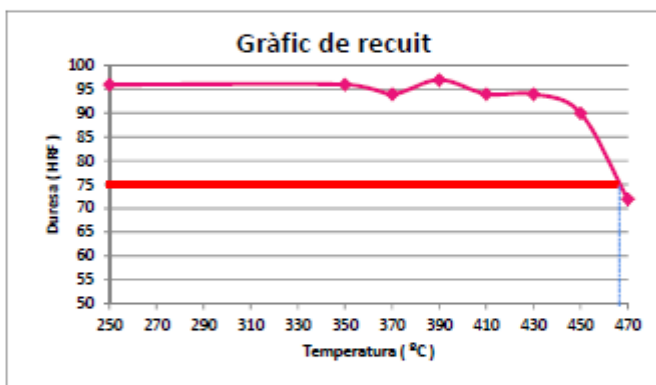
Mostra N°	28
T recuit (°C)	415

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	97
350	93
370	93
390	94
410	89
430	54



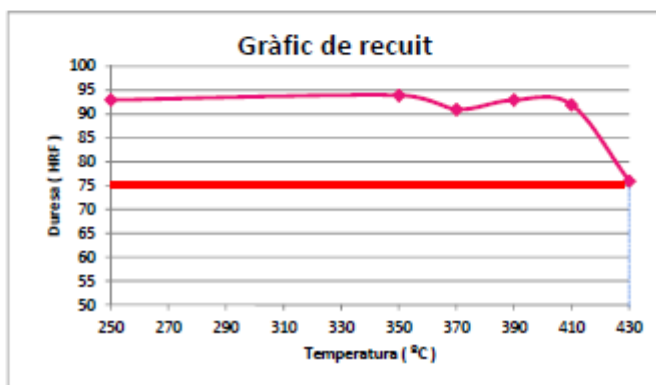
Mostra N°	29
T recuit (°C)	465

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	96
350	96
370	94
390	97
410	94
430	94
450	90
470	72



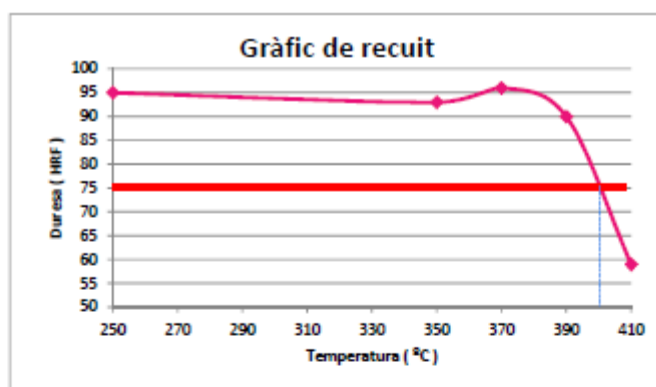
Mostra N°	30
T recuit (°C)	430

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	93
350	94
370	91
390	93
410	92
430	76



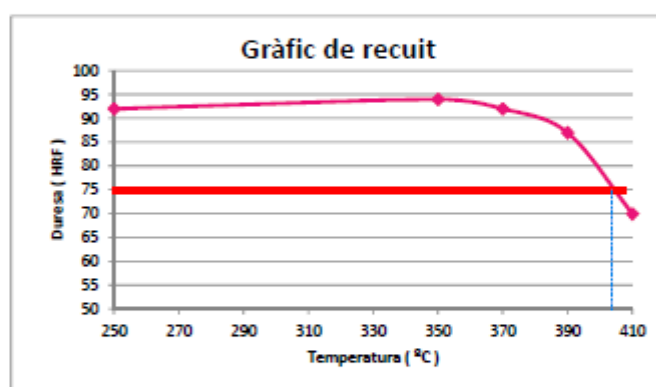
Mostra N°	31
T recuit (°C)	400

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	95
350	93
370	96
390	90
410	59



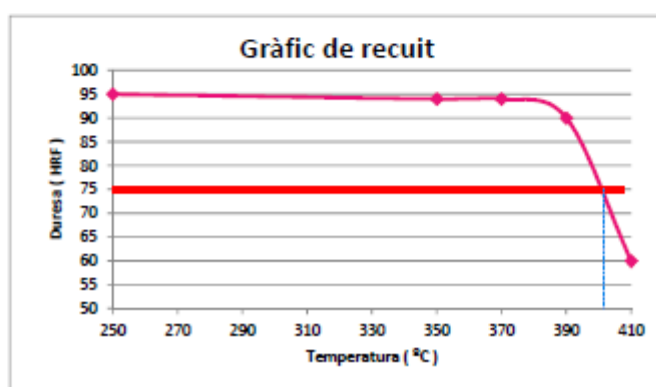
Mostra N°	32
T recuit (°C)	405

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	92
350	94
370	92
390	87
410	70



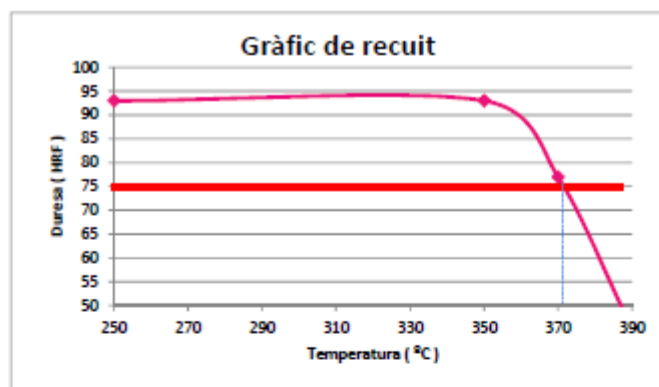
Mostra N°	33
T recuit (°C)	395

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	95
350	94
370	94
390	90
410	60



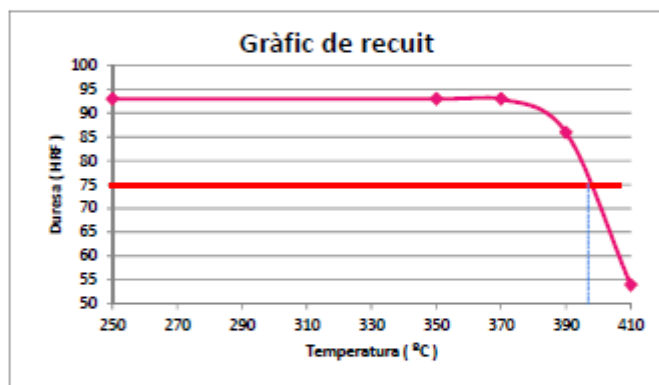
Mostra N°	34
T recuit (°C)	370

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	93
350	93
370	77
390	45



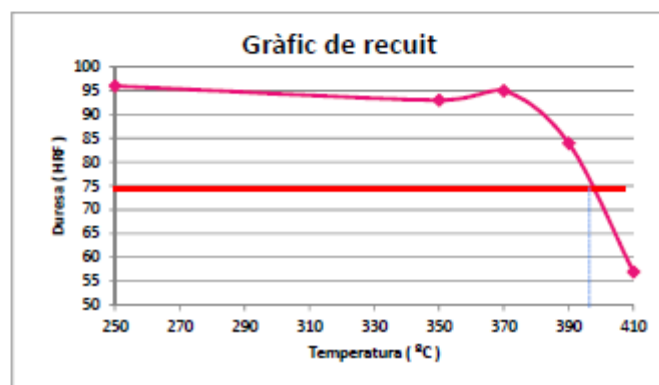
Mostra N°	35
T recuit (°C)	395

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	93
350	93
370	93
390	86
410	54



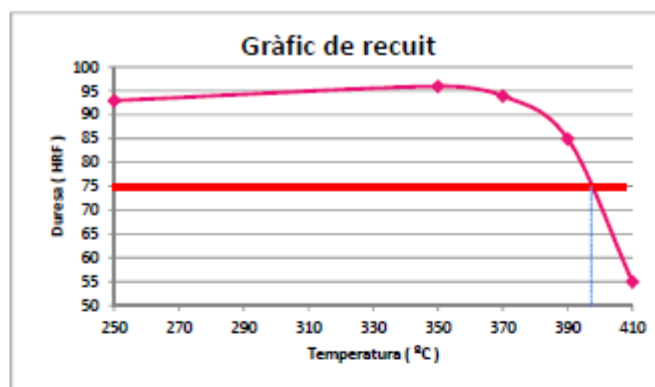
Mostra N°	36
T recuit (°C)	395

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	96
350	93
370	95
390	84
410	57



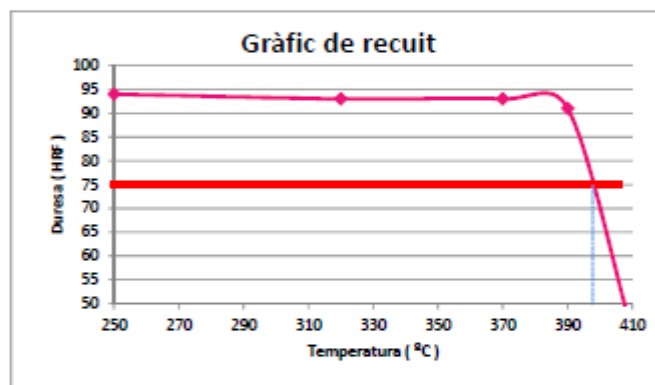
Mostra N°	37
T recuit (°C)	395

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	93
350	96
370	94
390	85
410	55



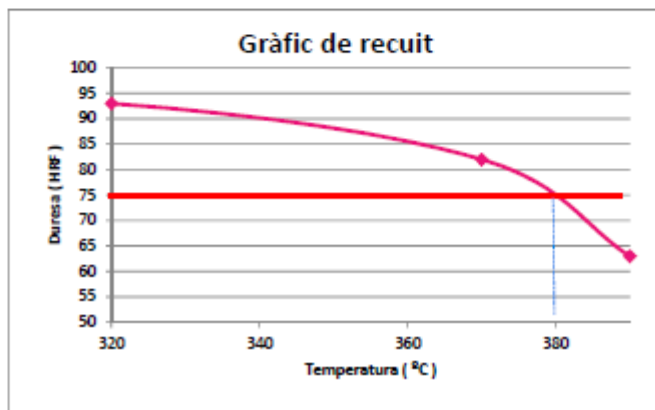
Mostra N°	38
T recuit (°C)	395

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	94
320	93
370	93
390	91
410	44



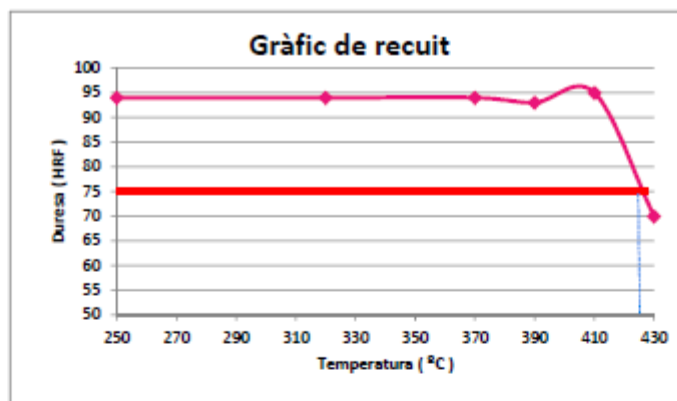
Mostra N°	39
T recuit (°C)	380

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	95
320	93
370	82
390	63



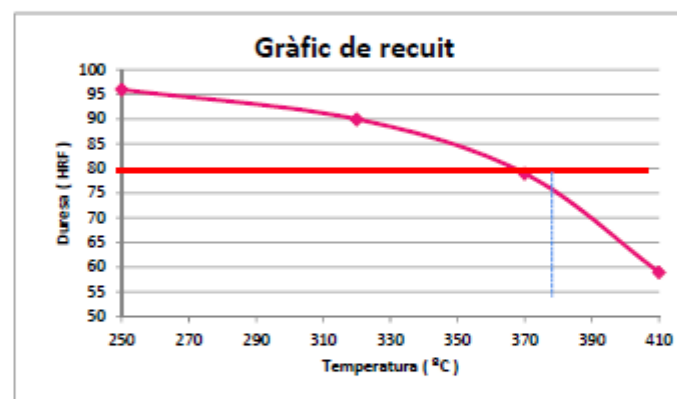
Mostra Nº	40
T recuit (°C)	425

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	94
320	94
370	94
390	93
410	95
430	70



Mostra Nº	41
T recuit (°C)	380

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	96
320	90
370	79
410	59



Mostra Nº	42
T recuit (°C)	425

Temperatura (°C)	Duresa (HRF)
250	87
320	89
370	84
390	83
410	84
430	71

